



**DURABILIDADE DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM  
ESTRUTURAS DE CARÁCTER AMBIENTAL - A IMPORTÂNCIA  
DA INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS QUÍMICOS**

**José Ricardo da Cunha Carneiro**

Dezembro de 2009

Dissertação para Doutoramento em Engenharia do Ambiente  
na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Aos meus pais, Maria Augusta (*in memoriam*) e José





# Índice geral

|                         | Pág.  |
|-------------------------|-------|
| Índice geral            | V     |
| Resumo                  | VII   |
| Abstract                | IX    |
| Résumé                  | XI    |
| Agradecimentos          | XIII  |
| Índice de texto         | XV    |
| Índice de figuras       | XXVII |
| Índice de quadros       | XLV   |
| Abreviaturas e símbolos | LXIII |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Considerações iniciais | 1 |
|------------------------|---|

## PARTE I

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 1 - Geossintéticos - aspectos gerais                                    | 5  |
| Capítulo 2 - Normas e ensaios em geossintéticos. Propriedades dos geossintéticos | 25 |
| Capítulo 3 - Durabilidade dos geossintéticos                                     | 51 |

## PARTE II

|   |     |
|---|-----|
| Capítulo 4 - Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis nos diversos ensaios de durabilidade    | 111 |
| Capítulo 5 - Principais características dos geotêxteis estudados. Amostragem e preparação de provetes | 153 |
| Capítulo 6 - Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos                                    | 175 |
| Capítulo 7 - Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação - método do forno            | 199 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Capítulo 8</b> - Desenvolvimento de um novo equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação | 261 |
| <b>Capítulo 9</b> - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados artificialmente                   | 291 |
| <b>Capítulo 10</b> - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais                                      | 365 |
| <b>Capítulo 11</b> - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo   | 437 |

### **PARTE III**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Capítulo 12</b> - Resistência de georredes de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos    | 455 |
| <b>Capítulo 13</b> - Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos | 495 |
| <b>Considerações Finais</b>  | 511 |
| <b>Bibliografia</b>  | 517 |

# Resumo

Os geossintéticos são materiais poliméricos muito aplicados em diversas obras de Engenharia Civil, algumas delas de carácter ambiental, como é o caso dos aterros de resíduos. Nas suas mais variadas aplicações, os geossintéticos podem estar expostos (durante um maior ou menor período de tempo) a vários agentes de degradação, tais como: a radiação ultravioleta e outros agentes climatéricos, as temperaturas elevadas, o oxigénio, as espécies químicas como ácidos ou bases ou os microrganismos e outros agentes do solo. A exposição prolongada a estes agentes pode causar um impacto negativo nas propriedades dos geossintéticos, afectando a sua durabilidade e diminuindo o seu tempo de vida útil. Em algumas aplicações (como por exemplo, no caso dos aterros de resíduos), a falha prematura destes materiais poderá ter graves consequências ambientais. Assim, e para uma aplicação correcta dos geossintéticos, é necessário prever a sua degradação ao longo do tempo, de modo a assegurar valores mínimos de certas propriedades (físicas, mecânicas e hidráulicas) dos materiais durante o tempo de vida da estrutura onde estão inseridos.

O principal objectivo deste trabalho foi avaliar a resistência dos geossintéticos face a vários agentes de degradação físicos e químicos. Este trabalho, associando a Química à Engenharia Civil, pretende contribuir para uma melhor compreensão da durabilidade dos geossintéticos e permitir, assim, uma melhor aplicação destes materiais nas mais diversas obras de construção civil (tendo em conta, logo à partida, a degradação que os materiais irão sofrer durante o seu tempo de serviço); a garantia de durabilidade é um requisito indispensável para a aplicação dos geossintéticos.

Neste trabalho, a durabilidade de vários geossintéticos (geotêxteis, georredes e geomembranas) foi estudada através da exposição dos materiais a diversos agentes de degradação físicos e/ou químicos e posterior avaliação do efeito desses agentes nas suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas. Os geossintéticos foram imersos em várias soluções químicas (a temperatura elevada e à temperatura ambiente), expostos à termo-oxidação (pelo método clássico do forno e através de um novo método de ensaio desenvolvido neste trabalho), expostos à acção da radiação ultravioleta e de outros agentes climatéricos (tanto ao ar livre, como em laboratório) e expostos *in situ* aos agentes do solo. Os geossintéticos usados neste trabalho (à excepção das geomembranas) foram fabricados com diferentes estabilizações químicas. Deste modo, foi possível avaliar a contribuição dos aditivos químicos para o aumento da durabilidade dos materiais.



# Abstract

Geosynthetics are polymeric materials widely applied in Civil Engineering structures, some of them of environmental nature, such as the waste landfills. In their applications, the geosynthetics may be exposed (during a longer or shorter period of time) to many degradation agents, such as: ultraviolet radiation and other weathering agents, high temperatures, oxygen, chemical species like acids or alkalis or microorganisms and other soil agents. An extended exposure to these agents can cause a negative impact on the properties of the geosynthetics, affecting their durability and shortening their useful lifetime. In some applications (for example, in waste landfills), the premature failure of these materials may have serious environmental consequences. So, for the proper application of the geosynthetics, it is necessary to take into account their degradation through time, in order to assure minimum values of certain properties (physical, mechanical and hydraulic) of the materials during the lifetime of the structure where they are inserted.

The main objective of this study was to evaluate the resistance of the geosynthetics against several physical and chemical degradation agents. This work, associating Chemistry with Civil Engineering, aims to contribute to a better understanding of the durability of the geosynthetics and, this way, allow a better application of these materials in civil construction (taking into account the damages that the materials will suffer during their service lifetime); the assurance of durability is a crucial requirement for the application of the geosynthetics.

In this work, the durability of several geosynthetics (geotextiles, geonets and geomembranes) was studied by exposing the materials to various physical and chemical degradation agents. Afterwards, it was evaluated the effect of those agents on some physical, chemical, mechanical and hydraulic properties of the materials. The geosynthetics were immersed in several chemical solutions (at high temperatures and at room temperature), exposed to thermo-oxidation (by the classic oven ageing test and by a new method developed in this research), exposed to ultraviolet radiation and to other weathering agents (both outdoors and in laboratory) and exposed *in situ* to the agents of the soil. The geosynthetics used in this work (with the exception of the geomembranes) were manufactured with different chemical compositions. This way, it was possible to evaluate the contribution of the chemical additives to the overall durability of the materials.



# Résumé

Les géosynthétiques sont des matériaux polymériques très appliqués dans divers ouvrages de Génie Civil, dont certains de caractère environnemental, comme c'est le cas des décharges. Dans ses plus vastes applications, les géosynthétiques peuvent être exposés (durant une plus ou moins longue durée) à différents agents de dégradation, comme par exemple: le rayonnement ultraviolet et autres agents climatiques, les températures élevées, l'oxygène, les espèces chimiques comme les acides ou bases ou les micro-organismes et autres agents du sol. L'exposition prolongée à ces agents peut causer un impact négatif sur les propriétés des géosynthétiques, ce qui affecte leur durabilité et diminue leur durée de vie utile. Dans certaines applications (comme par exemple dans le cas des décharges), la défaillance prématurée de ces matériaux pourra avoir des conséquences environnementales graves. Ainsi, et pour une application correcte des géosynthétiques, il faut prévoir leur dégradation au fil du temps, de façon à pouvoir assurer des minimums de certaines propriétés (physiques, mécaniques et hydrauliques) des matériaux durant la durée de vie de la structure dans laquelle ils sont insérés.

Le principal objectif de ce travail a été d'évaluer la résistance des géosynthétiques face à différents agents de dégradation physique et chimique. Ce travail, qui associe la Chimie au Génie Civil, prétend contribuer pour une meilleure compréhension de la durabilité des géosynthétiques et permettre, ainsi, une meilleure application de ces matériaux dans les plus divers ouvrages de Génie Civil (en tenant compte, dès le départ, de la dégradation que les matériaux iront souffrir durant leur temps de service); la garantie de la durabilité est une exigence indispensable pour l'application des géosynthétiques.

Dans cette étude, la durabilité de différents géosynthétiques a été étudiée à travers l'exposition des matériaux à différents agents de dégradation physique et/ou chimiques et postérieure évaluation de l'effet de ces agents sur leurs propriétés physiques, chimiques, mécaniques et hydrauliques. Les géosynthétiques ont été immergés dans différentes solutions chimiques (à température élevée et à température ambiante), exposés à la thermo-oxydation (par la méthode classique du four et à travers d'une nouvelle méthode d'essai développée durant ce travail), exposés à l'action de rayonnement ultraviolet et d'autres agents climatiques (à l'air libre et en laboratoire) et exposés in situ aux agents du sol. Les géosynthétiques utilisés dans ce travail (à l'exception des géomembranes) ont été fabriqués avec différentes stabilités chimiques. De cette façon, il a été possible d'évaluer la contribution des additifs chimiques pour la durabilité des matériaux.





# Agradecimentos

O presente trabalho teve o contributo de várias pessoas e/ou instituições, às quais desejo expressar os meus agradecimentos:

À Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, por ter acreditado em mim, pela confiança, por toda a ajuda e dedicação, pelo incentivo, pela disponibilidade permanente e pela amizade [foi, é e será sempre um prazer trabalhar consigo];

Ao Professor Doutor Paulo Joaquim Almeida, por toda a ajuda, pela total disponibilidade, por todo o apoio, pelo incentivo e pela amizade;

Ao Laboratório da Geossintéticos da FEUP, na pessoa da sua Directora, a Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pela disponibilização do espaço e de uma parte dos equipamentos usados;

Ao Laboratório de Química Analítica e Qualidade Alimentar (QuaQua) da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na pessoa do seu Director, o Professor Doutor Aquiles Araújo Barros, pela disponibilização de todas as condições para a realização de uma parte deste trabalho;

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), pelo apoio financeiro no âmbito dos projectos de investigação POCTI/ECM/42822/2001 e PTDC/ECM/67547/2006;

À Carvalhos, LDA, pelo fabrico das fibras e dos geotêxteis estudados neste trabalho;

À Guerner & Irmãos, S.A., pelo fabrico das georredes estudadas neste trabalho;

À Termolab - Fornos Eléctricos, LDA, pela colaboração na construção do equipamento protótipo para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação;

À Lipor, pela cedência do espaço para expor os geossintéticos à acção dos agentes climáticos reais e pela disponibilização de informação meteorológica;

À Ciba, pela oferta do aditivo Chimassorb 944 para o desenvolvimento do método cromatográfico;

À Professora Doutora Margarida Pinho Lopes e ao Mestre Rui Silvano, pelo excelente acolhimento na “equipa” de geossintéticos da FEUP, pela simpatia e por toda a atenção;

Ao Mestre Simão Moreira, por todo o auxílio prestado, pela dedicação, pela total disponibilidade e pela amizade;

Ao Dr. Iven Duarte, à Dra. Ana Ramos e à Dra. Inês Valente, pela colaboração no desenvolvimento do método para a determinação do aditivo Chimassorb 944; à Dra. Inês Valente, também pelo apoio nas análises por espectroscopia de infravermelho;

À D. Maria Teresa e à D. Júlia, pela atenção e simpatia;

A todos os meus colegas de trabalho (do Laboratório de Geossintéticos da FEUP e do Laboratório de Química Analítica e Qualidade Alimentar da FCUP), com os quais passei muitos e bons momentos;

Aos meus Pais, pelo incentivo e pelo apoio incondicional que sempre me deram;

À Daniela, por todo um conjunto de coisas que não podem ser traduzidas por palavras.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

# Índice de texto

|  | Pág. |
|--|------|
| Considerações iniciais   | 1    |
| <b>PARTE I</b>   |      |
| <b>1 - Geossintéticos - aspectos gerais</b>                                    |      |
| 1.1 - Introdução   | 5    |
| 1.2 - Breve história dos geossintéticos  | 5    |
| 1.3 - Tipos de geossintéticos  | 7    |
| 1.4 - Funções dos geossintéticos   | 8    |
| 1.5 - Matérias-primas usadas no fabrico de geossintéticos                      | 10   |
| 1.5.1 - Considerações iniciais   | 10   |
| 1.5.2 - Polímeros  | 11   |
| 1.5.2.1 - Aspectos gerais  | 11   |
| 1.5.2.2 - Reacções de polimerização  | 11   |
| 1.5.2.3 - Polímeros usados no fabrico de geossintéticos                        | 13   |
| 1.5.3 - Aditivos químicos  | 16   |
| 1.6 - Processos de fabrico dos geossintéticos                                  | 17   |
| 1.6.1 - Considerações iniciais   | 17   |
| 1.6.2 - Produção da mistura polimérica   | 17   |
| 1.6.3 - Produção dos componentes dos geossintéticos                            | 17   |
| 1.6.4 - Produção de geotêxteis   | 19   |
| 1.6.5 - Produção de geomembranas   | 22   |
| 1.7 - Principais aplicações dos geossintéticos                                 | 23   |
| 1.8 - Considerações finais   | 23   |
| <b>2 - Normas e ensaios em geossintéticos. Propriedades dos geossintéticos</b> |      |
| 2.1 - Introdução   | 25   |
| 2.2 - Normas e ensaios em geossintéticos                                       | 25   |
| 2.2.1 - Considerações iniciais   | 25   |
| 2.2.2 - Organismos de normalização   | 26   |
| 2.2.3 - Normas CEN   | 27   |
| 2.2.4 - Normas ISO   | 31   |
| 2.2.5 - Normas ASTM  | 33   |
| 2.2.6 - Considerações finais   | 38   |
| 2.3 - Propriedades dos geossintéticos  | 39   |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.1 - Considerações iniciais   | 39 |
| 2.3.2 - Propriedades físicas   | 39 |
| 2.3.2.1 - Densidade relativa   | 39 |
| 2.3.2.2 - Massa por unidade de área  | 40 |
| 2.3.2.3 - Espessura  | 40 |
| 2.3.2.4 - Distribuição e dimensão das aberturas                                    | 40 |
| 2.3.3 - Propriedades mecânicas   | 41 |
| 2.3.3.1 - Propriedades de tracção  | 41 |
| 2.3.3.2 - Fluência e rotura em fluência  | 43 |
| 2.3.3.3 - Resistência ao rasgamento  | 44 |
| 2.3.3.4 - Resistência ao punçoamento   | 44 |
| 2.3.3.5 - Atrito nas interfaces  | 45 |
| 2.3.4 - Propriedades hidráulicas   | 46 |
| 2.3.4.1 - Permeabilidade à água normal ao plano - permissividade                   | 46 |
| 2.3.4.2 - Permeabilidade à água no plano - transmissividade                        | 47 |
| 2.4 - Danificação dos geossintéticos - aspectos gerais                             | 48 |
| 2.4.1 - Considerações iniciais   | 48 |
| 2.4.2 - Danificação durante a instalação   | 48 |
| 2.4.3 - Abrasão  | 49 |
| 2.4.4 - Agentes de degradação físicos, químicos e biológicos                       | 49 |
| 2.5 - Considerações finais   | 50 |
| <br><b>3 - Durabilidade dos geossintéticos</b>                                     |    |
| 3.1 - Introdução   | 51 |
| 3.2 - Agentes e mecanismos de degradação dos geossintéticos                        | 51 |
| 3.2.1 - Considerações iniciais   | 51 |
| 3.2.2 - Acção dos líquidos   | 52 |
| 3.2.2.1 - Absorção de líquidos   | 52 |
| 3.2.2.2 - Extracção de aditivos  | 52 |
| 3.2.2.3 - Reacções químicas com líquidos   | 53 |
| 3.2.2.4 - Hidrólise  | 53 |
| 3.2.3 - Acção da temperatura   | 54 |
| 3.2.4 - Oxidação   | 55 |
| 3.2.4.1 - Aspectos gerais  | 55 |
| 3.2.4.2 - Mecanismos de oxidação   | 57 |
| 3.2.4.3 - Mecanismo de oxidação: caso particular do polietileno e do polipropileno | 58 |
| 3.2.5 - Acção dos agentes climatéricos   | 59 |
| 3.2.5.1 - Considerações iniciais   | 59 |
| 3.2.5.2 - Radiação solar   | 59 |
| 3.2.5.3 - Temperatura  | 61 |
| 3.2.5.4 - Oxigénio atmosférico   | 61 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.2.5.5 - Humidade  | 61 |
| 3.2.5.6 - Outros agentes de degradação ao ar livre                                    | 62 |
| 3.2.6 - Acção dos microrganismos  | 62 |
| 3.2.7 - Outros agentes de degradação  | 63 |
| 3.3 - Protecção da degradação - principais aditivos químicos usados em geossintéticos | 64 |
| 3.3.1 - Considerações iniciais  | 64 |
| 3.3.2 - Antioxidantes   | 65 |
| 3.3.2.1 - Antioxidantes primários   | 65 |
| 3.3.2.2 - Antioxidantes secundários   | 66 |
| 3.3.3 - Estabilizantes UV   | 68 |
| 3.3.3.1 - <i>UV screeners</i>   | 68 |
| 3.3.3.2 - <i>UV absorbers</i>   | 68 |
| 3.3.3.3 - Agentes de <i>quenching</i>   | 69 |
| 3.3.3.4 - HALS  | 70 |
| 3.3.4 - Pigmentos   | 71 |
| 3.4 - Aditivos químicos presentes nos geossintéticos estudados neste trabalho         | 72 |
| 3.4.1 - Considerações iniciais  | 72 |
| 3.4.2 - Chimassorb 944  | 72 |
| 3.4.2.1 - Principais características  | 72 |
| 3.4.2.2 - Determinação do Chimassorb 944 em materiais poliméricos                     | 73 |
| 3.4.3 - Tinuvin 622   | 76 |
| 3.4.4 - Tinuvin 783   | 76 |
| 3.4.5 - Negro de carbono  | 77 |
| 3.4.6 - Ftalocianinas de cobre  | 78 |
| 3.5 - Métodos para avaliar a durabilidade dos geossintéticos                          | 79 |
| 3.5.1 - Considerações iniciais  | 79 |
| 3.5.2 - Resistência aos líquidos  | 79 |
| 3.5.3 - Resistência às alterações de temperatura                                      | 81 |
| 3.5.4 - Resistência à oxidação  | 81 |
| 3.5.5 - Resistência aos agentes climatéricos simulados em laboratório                 | 85 |
| 3.5.5.1 - Considerações iniciais  | 85 |
| 3.5.5.2 - Tipos de simuladores climatéricos   | 86 |
| 3.5.5.3 - Fontes de luz   | 87 |
| 3.5.5.4 - Métodos normalizados de exposição aos agentes climatéricos em laboratório   | 88 |
| 3.5.5.5 - Estudos existentes na literatura  | 89 |
| 3.5.6 - Resistência aos agentes climatéricos reais                                    | 90 |
| 3.5.6.1 - Considerações iniciais  | 90 |
| 3.5.6.2 - Local de exposição  | 90 |
| 3.5.6.3 - Tipos de exposição  | 92 |
| 3.5.6.4 - Ângulo de exposição   | 93 |
| 3.5.6.5 - Orientação da exposição   | 94 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 3.5.6.6 - Tempo de exposição  | 94  |
| 3.5.6.7 - Métodos normalizados de exposição aos agentes climatéricos reais            | 94  |
| 3.5.6.8 - Estudos existentes na literatura  | 94  |
| 3.5.7 - Resistência aos microrganismos  | 96  |
| 3.5.8 - Resistência a outros agentes de degradação                                    | 96  |
| 3.6 - Algumas técnicas usadas para avaliar a danificação sofrida pelos geossintéticos | 97  |
| 3.6.1 - Considerações iniciais  | 97  |
| 3.6.2 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X               | 97  |
| 3.6.2.1 - Aspectos gerais   | 97  |
| 3.6.2.2 - Características das amostras  | 98  |
| 3.6.2.3 - Interações entre o feixe electrónico e a amostra                            | 99  |
| 3.6.2.4 - Instrumentação  | 100 |
| 3.6.2.5 - Microanálise por raio X   | 101 |
| 3.6.3 - Espectroscopia de infravermelho   | 101 |
| 3.6.4 - Cromatografia líquida de alta eficiência                                      | 105 |
| 3.6.4.1 - Considerações iniciais  | 105 |
| 3.6.4.2 - Componentes de um equipamento de cromatografia líquida de alta eficiência   | 105 |
| 3.6.4.3 - Processo cromatográfico   | 106 |
| 3.6.4.4 - Análise qualitativa   | 107 |
| 3.6.4.5 - Análise quantitativa  | 108 |
| 3.7 - Considerações finais  | 108 |

## PARTE II

### 4 - Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis nos diversos ensaios de durabilidade

|   |     |
|---|-----|
| 4.1 - Introdução  | 111 |
| 4.2 - Inspeção sensorial dos geotêxteis                                 | 112 |
| 4.3 - Ensaio de determinação da massa por unidade de área               | 112 |
| 4.3.1 - Descrição do ensaio   | 112 |
| 4.3.2 - Resultados de um ensaio tipo                                    | 113 |
| 4.4 - Ensaio de determinação da espessura                               | 114 |
| 4.4.1 - Descrição do ensaio   | 114 |
| 4.4.2 - Resultados de um ensaio tipo                                    | 116 |
| 4.5 - Ensaio de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319        | 116 |
| 4.5.1 - Introdução  | 116 |
| 4.5.2 - Equipamento de ensaio utilizado nos ensaios de tracção-extensão | 117 |
| 4.5.3 - Procedimento de ensaio  | 120 |
| 4.5.4 - Resultados obtidos a partir de um ensaio de tracção-extensão    | 122 |
| 4.5.4.1 - Considerações iniciais  | 122 |
| 4.5.4.2 - Resistência à tracção   | 123 |
| 4.5.4.3 - Extensão na força máxima                                      | 123 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 4.5.4.4 - Rigidez secante   | 124 |
| 4.5.4.5 - Robustez  | 124 |
| 4.5.4.6 - Resultados de um ensaio tipo  | 125 |
| 4.6 - Ensaio de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3  | 128 |
| 4.6.1 - Introdução  | 128 |
| 4.6.2 - Descrição do ensaio: Equipamento, método e resultados obtidos                                   | 128 |
| 4.7 - Ensaio de rasgamento  | 130 |
| 4.7.1 - Introdução  | 130 |
| 4.7.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos                                   | 130 |
| 4.7.3 - Resultados de um ensaio tipo  | 132 |
| 4.8 - Ensaio de punção estático   | 134 |
| 4.8.1 - Introdução  | 134 |
| 4.8.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos                                   | 134 |
| 4.8.3 - Resultados de um ensaio tipo  | 136 |
| 4.9 - Ensaio de determinação da permeabilidade à água normal ao plano                                   | 138 |
| 4.9.1 - Introdução  | 138 |
| 4.9.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos                                   | 138 |
| 4.9.3 - Resultados de um ensaio tipo  | 141 |
| 4.10 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X                                  | 143 |
| 4.11 - Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier                                      | 145 |
| 4.12 - Determinação do aditivo Chimassorb 944 por HPLC-UV   | 146 |
| 4.12.1 - Introdução   | 146 |
| 4.12.2 - Método de determinação do Chimassorb 944 em geotêxteis de PP                                   | 146 |
| 4.12.3 - Quantificação do Chimassorb 944 nos geotêxteis de PP   | 149 |
| 4.13 - Considerações finais   | 151 |
| <br><b>5 - Principais características dos geotêxteis estudados. Amostragem e preparação de provetes</b> |     |
| 5.1 - Introdução  | 153 |
| 5.2 - Características dos geotêxteis estudados: estrutura e composição                                  | 153 |
| 5.3 - Caracterização dos geotêxteis estudados   | 155 |
| 5.3.1 - Determinação da massa por unidade de área   | 155 |
| 5.3.2 - Determinação da espessura   | 155 |
| 5.3.3 - Ensaio de tracção-extensão: NP EN ISO 10319   | 156 |
| 5.3.3.1 - Considerações iniciais  | 156 |
| 5.3.3.2 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico                             | 157 |
| 5.3.3.3 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico             | 160 |
| 5.3.4 - Ensaio de tracção-extensão: NP EN 29073-3   | 161 |
| 5.3.4.1 - Considerações iniciais  | 161 |
| 5.3.4.2 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico                             | 161 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| 5.3.4.3 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico  | 164 |
| 5.3.5 - Ensaio de rasgamento   | 165 |
| 5.3.6 - Ensaio de punçoamento estático   | 166 |
| 5.3.7 - Ensaio de determinação da permeabilidade à água normal ao plano                      | 168 |
| 5.3.8 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X                      | 170 |
| 5.4 - Princípios gerais de amostragem e de preparação de provetes                            | 171 |
| 5.5 - Considerações finais   | 173 |
| <br><b>6 - Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos</b>                         |     |
| 6.1 - Introdução   | 175 |
| 6.2 - Descrição experimental   | 175 |
| 6.2.1 - Procedimento geral dos ensaios, equipamento e reagentes                              | 175 |
| 6.2.2 - Ensaio de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447                        | 177 |
| 6.2.3 - Ensaio de imersão a 90 °C  | 177 |
| 6.2.4 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente   | 178 |
| 6.3 - Resultados experimentais   | 179 |
| 6.3.1 - Ensaio de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447                        | 179 |
| 6.3.1.1 - Considerações iniciais   | 179 |
| 6.3.1.2 - Geotêxtil B0-500   | 179 |
| 6.3.1.3 - Geotêxtil B2-500   | 181 |
| 6.3.1.4 - Geotêxtil B4-500   | 182 |
| 6.3.1.5 - Geotêxtil P2-500   | 183 |
| 6.3.1.6 - Geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup>   | 185 |
| 6.3.1.7 - Considerações finais   | 185 |
| 6.3.2 - Ensaio de imersão a 90 °C  | 186 |
| 6.3.2.1 - Resistência em meio ácido - geotêxtil B0-500                                       | 186 |
| 6.3.2.2 - Resistência em meio ácido - geotêxtil B4-500                                       | 188 |
| 6.3.2.3 - Resistência em meio alcalino - geotêxtil B0-500                                    | 190 |
| 6.3.2.4 - Resistência em meio alcalino - geotêxtil B4-500                                    | 193 |
| 6.3.3 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente   | 194 |
| 6.3.3.1 - Geotêxtil B0-500   | 194 |
| 6.3.3.2 - Geotêxtil B4-500   | 196 |
| 6.4 - Considerações finais   | 197 |
| <br><b>7 - Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação - método do forno</b> |     |
| 7.1 - Introdução   | 199 |
| 7.2 - Descrição geral do ensaio de termo-oxidação  | 200 |
| 7.3 - Resultados experimentais   | 201 |
| 7.3.1 - Avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação                             | 201 |
| 7.3.1.1 - Considerações iniciais   | 201 |



---

|   |     |
|---|-----|
| 7.3.1.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500                                      | 201 |
| 7.3.1.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500                | 206 |
| 7.3.1.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500                | 210 |
| 7.3.1.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500     | 213 |
| 7.3.1.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis à oxidação induzida pela temperatura       | 217 |
| 7.3.1.7 - Considerações finais  | 218 |
| 7.3.2 - Efeito do tempo de exposição na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação      | 219 |
| 7.3.2.1 - Considerações iniciais  | 219 |
| 7.3.2.2 - Resultados obtidos  | 219 |
| 7.3.3 - Efeito da temperatura na velocidade de degradação do geotêxtil B0-280                 | 222 |
| 7.3.3.1 - Considerações iniciais  | 222 |
| 7.3.3.2 - Ensaio de termo-oxidação a 100 °C   | 222 |
| 7.3.3.3 - Ensaio de termo-oxidação a 90 °C  | 223 |
| 7.3.3.4 - Ensaio de termo-oxidação a 80 °C  | 225 |
| 7.3.3.5 - Comparação da velocidade de degradação a diferentes temperaturas                    | 226 |
| 7.3.3.6 - Aplicação do modelo de Arrhenius na previsão do tempo de vida do geotêxtil B0-280   | 227 |
| 7.3.4 - Efeito da imersão em líquidos na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação     | 232 |
| 7.3.4.1 - Considerações iniciais  | 232 |
| 7.3.4.2 - Resistência do geotêxtil B2-280 à imersão em líquidos                               | 233 |
| 7.3.4.3 - Efeito da imersão em água na resistência à termo-oxidação                           | 234 |
| 7.3.4.4 - Efeito da imersão em ácido sulfúrico na resistência à termo-oxidação                | 235 |
| 7.3.4.5 - Efeito da imersão em ácido nítrico na resistência à termo-oxidação                  | 238 |
| 7.3.4.6 - Efeito da imersão em hidróxido de sódio na resistência à termo-oxidação             | 239 |
| 7.3.4.7 - Comparação do efeito das várias imersões na resistência à termo-oxidação            | 241 |
| 7.3.4.8 - Considerações finais  | 242 |
| 7.3.5 - Efeito dos cátions metálicos na resistência dos geotêxteis à termo-oxidação           | 242 |
| 7.3.5.1 - Considerações iniciais  | 242 |
| 7.3.5.2 - Resistência do geotêxtil B2-280 à imersão em soluções de cátions metálicos          | 243 |
| 7.3.5.3 - Efeito do cátion cádmio na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação         | 245 |
| 7.3.5.4 - Efeito do cátion cobre na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação          | 247 |
| 7.3.5.5 - Efeito do cátion ferro na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação          | 249 |
| 7.3.5.6 - Efeito do cátion zinco na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação          | 251 |
| 7.3.5.7 - Comparação do efeito dos vários cátions metálicos na resistência à termo-oxidação   | 252 |
| 7.3.5.8 - Efeito da concentração de ferro na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação | 254 |
| 7.3.5.9 - Efeito do cátion ferro na resistência do geotêxtil B4-280 à termo-oxidação          | 257 |
| 7.3.5.10 - Considerações finais   | 260 |
| 7.4 - Considerações finais  | 260 |

---

## **8 - Desenvolvimento de um novo equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação**

|  |     |
|--|-----|
| 8.1 - Introdução   | 261 |
| 8.2 - Equipamento desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação            | 261 |
| 8.2.1 - Descrição geral do equipamento   | 261 |
| 8.2.2 - Esquemas do equipamento desenvolvido   | 263 |
| 8.2.3 - Componentes instalados no equipamento  | 266 |
| 8.2.3.1 - Componentes instalados na parede superior do autoclave                         | 266 |
| 8.2.3.2 - Componentes instalados na parede traseira do autoclave                         | 266 |
| 8.2.3.3 - Componentes instalados no interior do autoclave                                | 267 |
| 8.2.3.4 - Componentes instalados na unidade de controlo                                  | 267 |
| 8.2.3.5 - Funções dos componentes instalados no equipamento                              | 268 |
| 8.2.4 - Sistema de fecho e de estanquicidade do autoclave                                | 269 |
| 8.2.5 - Aperfeiçoamentos futuros do equipamento  | 271 |
| 8.3 - Método desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação                 | 271 |
| 8.4 - Comparação do novo método/equipamento com os outros métodos existentes             | 272 |
| 8.4.1 - Distinção entre o presente método e os outros métodos existentes                 | 272 |
| 8.4.2 - Vantagens e desvantagens do novo método em relação aos outros métodos existentes | 272 |
| 8.5 - Determinação da resistência dos geotêxteis à oxidação através do novo método       | 273 |
| 8.5.1 - Descrição do ensaio  | 273 |
| 8.5.2 - Evolução da temperatura e da pressão ao longo dos ensaios de termo-oxidação      | 274 |
| 8.5.3 - Resistência do geotêxtil B0-500 à termo-oxidação                                 | 276 |
| 8.5.4 - Resistência do geotêxtil B2-500 à termo-oxidação                                 | 281 |
| 8.5.5 - Resistência do geotêxtil B4-500 à termo-oxidação                                 | 283 |
| 8.5.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação                        | 286 |
| 8.6 - Resistência dos geotêxteis à termo-oxidação: o novo método vs o método do forno    | 287 |
| 8.7 - Considerações finais   | 289 |

## **9 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados artificialmente**

|   |     |
|---|-----|
| 9.1 - Introdução  | 291 |
| 9.2 - Descrição geral dos ensaios climáticos  | 292 |
| 9.3 - Resultados experimentais  | 296 |
| 9.3.1 - Efeito da composição do ciclo climático na resistência dos geotêxteis             | 296 |
| 9.3.1.1 - Características particulares dos ensaios  | 296 |
| 9.3.1.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500                                  | 297 |
| 9.3.1.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500            | 302 |
| 9.3.1.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500            | 308 |
| 9.3.1.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500 | 314 |
| 9.3.1.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis aos vários ensaios climáticos          | 317 |
| 9.3.2 - Efeito do tempo de exposição na resistência dos geotêxteis                        | 319 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 9.3.2.1 - Características particulares dos ensaios   | 319 |
| 9.3.2.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500   | 319 |
| 9.3.2.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500   | 322 |
| 9.3.2.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500   | 326 |
| 9.3.2.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500  | 329 |
| 9.3.2.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis a diferentes tempos de exposição no QUV   | 332 |
| 9.3.3 - Efeito da temperatura do passo de exposição UV na resistência dos geotêxteis   | 333 |
| 9.3.3.1 - Características particulares dos ensaios   | 333 |
| 9.3.3.2 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500   | 333 |
| 9.3.3.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500   | 335 |
| 9.3.3.4 - Comparação da resistência dos geotêxteis às diversas temperaturas de exposição UV  | 338 |
| 9.3.4 - Efeito da irradiância durante o passo de exposição UV na resistência dos geotêxteis  | 339 |
| 9.3.4.1 - Características particulares dos ensaios   | 339 |
| 9.3.4.2 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500   | 339 |
| 9.3.4.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500   | 341 |
| 9.3.4.4 - Comparação da resistência dos geotêxteis às diversas irradiâncias de exposição UV  | 344 |
| 9.3.5 - Ensaios climáticos segundo a norma NP EN 12224   | 344 |
| 9.3.5.1 - Características particulares dos ensaios   | 344 |
| 9.3.5.2 - Principais resultados obtidos  | 345 |
| 9.3.6 - Efeito da imersão em líquidos na resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos   | 346 |
| 9.3.6.1 - Características particulares dos ensaios   | 346 |
| 9.3.6.2 - Resistência do geotêxtil B2-500 à imersão em várias soluções químicas  | 348 |
| 9.3.6.3 - Efeito dos ensaios de imersão à temperatura ambiente na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos             | 350 |
| 9.3.6.4 - Efeito dos ensaios de imersão a 90°C na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos                             | 352 |
| 9.3.7 - Efeito dos cátions metálicos na resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos  | 355 |
| 9.3.7.1 - Características particulares dos ensaios   | 355 |
| 9.3.7.2 - Resistência do geotêxtil B2-500 à imersão em soluções de cátions metálicos   | 356 |
| 9.3.7.3 - Efeito dos ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos | 358 |
| 9.3.8 - Avaliação da foto-degradação dos geotêxteis por FTIR   | 360 |
| 9.3.8.1 - Características particulares dos ensaios   | 360 |
| 9.3.8.2 - Principais resultados obtidos  | 360 |
| 9.3.9 - Determinação do teor de C944 nos geotêxteis expostos aos agentes climáticos  | 362 |
| 9.4 - Considerações finais   | 363 |
| <br>   |     |
| <b>10 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais</b>  |     |
| <br>   |     |
| 10.1 - Introdução  | 365 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 10.2 - Descrição do ensaio de exposição aos agentes climáticos reais                               | 366 |
| 10.3 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climáticos                   | 370 |
| 10.4 - Resultados experimentais  | 373 |
| 10.4.1 - Inspeção visual   | 373 |
| 10.4.2 - Determinação da massa por unidade de área   | 378 |
| 10.4.2.1 - Geotêxteis brancos com 280 g.m <sup>-2</sup> : B0-280, B2-280 e B4-280                  | 378 |
| 10.4.2.2 - Geotêxteis brancos com 500 g.m <sup>-2</sup> : B0-500, B2-500 e B4-500                  | 380 |
| 10.4.2.3 - Geotêxteis pretos: P2-280 e P2-500  | 382 |
| 10.4.3 - Determinação da espessura   | 383 |
| 10.4.3.1 - Geotêxteis brancos com 280 g.m <sup>-2</sup> : B0-280, B2-280 e B4-280                  | 383 |
| 10.4.3.2 - Geotêxteis brancos com 500 g.m <sup>-2</sup> : B0-500, B2-500 e B4-500                  | 386 |
| 10.4.3.3 - Geotêxteis pretos: P2-280 e P2-500  | 388 |
| 10.4.4 - Ensaio de tracção-extensão  | 389 |
| 10.4.4.1 - Geotêxtil B0-280  | 389 |
| 10.4.4.2 - Geotêxtil B2-280  | 391 |
| 10.4.4.3 - Geotêxtil B4-280  | 392 |
| 10.4.4.4 - Geotêxtil P2-280  | 394 |
| 10.4.4.5 - Geotêxtil B0-500  | 396 |
| 10.4.4.6 - Geotêxtil B2-500  | 398 |
| 10.4.4.7 - Geotêxtil B4-500  | 400 |
| 10.4.4.8 - Geotêxtil P2-500  | 402 |
| 10.4.4.9 - Comparação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais                   | 403 |
| 10.4.5 - Ensaio de rasgamento  | 405 |
| 10.4.6 - Ensaio de punção estático   | 407 |
| 10.4.7 - Determinação da permeabilidade à água normal ao plano                                     | 410 |
| 10.4.7.1 - Geotêxtil B0-500  | 410 |
| 10.4.7.2 - Geotêxtil B2-500  | 411 |
| 10.4.7.3 - Geotêxtil B4-500  | 413 |
| 10.4.7.4 - Geotêxtil P2-500  | 414 |
| 10.4.7.5 - Comparação das $v_{20}$ H50 dos geotêxteis após a exposição aos agentes climáticos      | 415 |
| 10.4.8 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X                           | 417 |
| 10.4.8.1 - Geotêxtil B0-500  | 417 |
| 10.4.8.2 - Geotêxtil B2-500  | 422 |
| 10.4.8.3 - Geotêxtil B4-500  | 424 |
| 10.4.8.4 - Geotêxtil P2-500  | 428 |
| 10.4.9 - Determinação do teor de C944 nos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais         | 431 |
| 10.5 - Resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos: exposição real vs simulação laboratorial | 433 |
| 10.6 - Considerações finais  | 436 |

---

**11 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo**

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 11.1 - Introdução                  | 437 |
| 11.2 - Descrição experimental      | 437 |
| 11.3 - Resultados experimentais    | 440 |
| 11.3.1 - Avaliação visual          | 440 |
| 11.3.2 - Ensaio de tração-extensão | 444 |
| 11.3.2.1 - Geotêxtil B0-280        | 444 |
| 11.3.2.2 - Geotêxtil B0-500        | 447 |
| 11.3.3 - Ensaio de rasgamento      | 450 |
| 11.3.3.1 - Geotêxtil B0-280        | 450 |
| 11.3.3.2 - Geotêxtil B0-500        | 450 |
| 11.4 - Considerações finais        | 451 |

**PARTE III****12 - Resistência de georredes de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos**

|   |     |
|---|-----|
| 12.1 - Introdução   | 455 |
| 12.2 - Georredes  | 455 |
| 12.3 - Avaliação da danificação sofrida pelas georredes                             | 457 |
| 12.4 - Caracterização mecânica das amostras de referência das georredes             | 458 |
| 12.5 - Determinação da resistência das georredes a soluções ácidas e alcalinas      | 459 |
| 12.5.1 - Descrição experimental   | 459 |
| 12.5.2 - Georrede B0  | 460 |
| 12.5.3 - Georrede B2  | 461 |
| 12.6 - Determinação da resistência das georredes à termo-oxidação: método do forno  | 462 |
| 12.6.1 - Descrição experimental   | 462 |
| 12.6.2 - Georrede B0  | 463 |
| 12.6.3 - Georrede B2  | 464 |
| 12.6.4 - Georrede P0  | 466 |
| 12.6.5 - Georrede P2  | 467 |
| 12.6.6 - Georrede V0  | 468 |
| 12.7 - Determinação da resistência das georredes à termo-oxidação: novo método      | 469 |
| 12.7.1 - Descrição experimental   | 469 |
| 12.7.2 - Principais resultados obtidos  | 470 |
| 12.8 - Determinação da resistência das georredes aos agentes climáticos artificiais | 472 |
| 12.8.1 - Descrição experimental   | 472 |
| 12.8.2 - Georrede B0  | 473 |
| 12.8.3 - Georrede B2  | 475 |
| 12.8.4 - Georrede P0  | 477 |
| 12.8.5 - Georrede P2  | 479 |
| 12.8.6 - Georrede V0  | 480 |

---

|   |         |
|---|---------|
| 12.9 - Determinação da resistência das georredes aos agentes climáticos reais                                 | 482     |
| 12.9.1 - Descrição experimental   | 482     |
| 12.9.2 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climáticos                            | 483     |
| 12.9.3 - Georrede B0  | 485     |
| 12.9.4 - Georrede B2  | 487     |
| 12.9.5 - Georrede P0  | 489     |
| 12.9.6 - Georrede P2  | 490     |
| 12.9.7 - Georrede V0  | 492     |
| 12.10 - Considerações finais  | 493     |
| <br><b>13 - Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos</b> |         |
| 13.1 - Introdução   | 495     |
| 13.2 - Geomembranas   | 495     |
| 13.3 - Avaliação da danificação sofrida pelas geomembranas  | 496     |
| 13.3.1 - Considerações iniciais   | 496     |
| 13.3.2 - Ensaio de tração-deformação  | 497     |
| 13.3.3 - Ensaio de rasgamento   | 499     |
| 13.4 - Caracterização mecânica das amostras de referência das geomembranas                                    | 501     |
| 13.5 - Determinação da resistência das geomembranas a soluções ácidas e alcalinas                             | 501     |
| 13.5.1 - Descrição experimental   | 501     |
| 13.5.2 - Resultados obtidos   | 502     |
| 13.6 - Determinação da resistência das geomembranas à termo-oxidação  | 503     |
| 13.6.1 - Descrição experimental   | 503     |
| 13.6.2 - Resultados obtidos   | 503     |
| 13.7 - Determinação da resistência das geomembranas aos agentes climáticos artificiais                        | 504     |
| 13.7.1 - Descrição experimental   | 504     |
| 13.7.2 - Resultados obtidos   | 505     |
| 13.8 - Determinação da resistência das geomembranas aos agentes climáticos reais                              | 506     |
| 13.8.1 - Descrição experimental   | 506     |
| 13.8.2 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climáticos                            | 507     |
| 13.8.3 - Resultados obtidos   | 508     |
| 13.9 - Considerações finais   | 509     |
| <br><b>Considerações Finais</b>   | <br>511 |
| <br><b>Bibliografia</b>   | <br>517 |

# Índice de figuras

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>PARTE I</b>  |      |
| <b>Capítulo 1 - Geossintéticos - aspectos gerais</b>  |      |
| Figura 1.1 - Classificação dos geossintéticos.  | 7    |
| Figura 1.2 - Alguns exemplos de geossintéticos: (a) geotêxteis; (b) geogrelhas; (c) geomembranas; (d) geocompósito de drenagem; (e) geocélulas.   | 7    |
| Figura 1.3 - Principais funções desempenhadas pelos geossintéticos (EN ISO 10318:2005): (a) drenagem; (b) filtragem; (c) protecção; (d) reforço; (e) separação; (f) controlo de erosão superficial; (g) barreira de fluidos.  | 9    |
| Figura 1.4 - Reacção de polimerização do etileno.   | 12   |
| Figura 1.5 - Reacção de polimerização do propileno.   | 12   |
| Figura 1.6 - Reacção de formação do nylon 66 (poliamida).   | 13   |
| Figura 1.7 - Reacção de formação do polietileno tereftalato (poliéster).  | 13   |
| Figura 1.8 - Processo industrial de fabrico de monofilamentos de PP: (a) vista geral; (b) pormenor do molde de extrusão.  | 18   |
| Figura 1.9 - Processo de estiramento de monofilamentos de PP: (a) passagem por um tanque de água quente; (b) passagem por cilindros rotativos.  | 18   |
| Figura 1.10 - Processo de corte dos monofilamentos de PP: (a) vista geral do processo; (b) pormenor do sistema de corte e de recolha das fibras (por aspiração).  | 19   |
| Figura 1.11 - Geotêxteis tecidos e não-tecidos: (a) tecido com monofilamento e multifilamento; (b) tecido com monofilamento e tira; (c) tecido com tiras; (d) não-tecido com ligação mecânica; (e) não-tecido com ligação térmica.  | 19   |
| Figura 1.12 - Estrutura típica dos geotêxteis tecidos.  | 20   |
| Figura 1.13 - Processo de fabrico de geotêxteis não-tecidos - ligação mecânica por agulhagem: (a) esquema geral; (b) exemplos de agulhas; (c) processo de agulhagem; (d) pormenor da placa com agulhas; (e) enrolamento do geotêxtil após o processo de agulhagem.  | 21   |
| Figura 1.14 - Estruturas típicas de têxteis tricotados.   | 21   |
| Figura 1.15 - Processo de fabrico de geomembranas por calandragem: (a) esquema geral; (b) efeitos da calandragem.   | 22   |
| Figura 1.16 - Principais aplicações dos geossintéticos (EN ISO 10318:2005): (a) reservatórios e barragens; (b) depósitos de resíduos líquidos; (c) depósitos de resíduos sólidos; (d) canais; (e) obras rodoviárias; (f) obras ferroviárias; (g) fundações e estruturas de suporte; (h) sistemas de controlo da erosão; (i) túneis e estruturas subterrâneas; (j) sistemas de drenagem. | 23   |
| <b>Capítulo 2 - Normas e ensaios em geossintéticos. Propriedades dos geossintéticos</b>   |      |
| Figura 2.1 - Curvas tensão-deformação de algumas geomembranas.  | 42   |
| Figura 2.2 - Geotêxteis: variação da resistência à tracção com a massa por unidade de área: (a) geotêxteis com várias estruturas; (b) geotêxteis de PP.   | 43   |
| Figura 2.3 - Aspecto geral das curvas força-extensão de alguns geotêxteis.  | 43   |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figura 2.4 - | Equipamento do LGS para a realização de ensaios de fluência e de rotura em fluência: (a) vista geral de um pórtico; (b) geotêxteis no início (à direita) e durante (à esquerda) um ensaio.                                   | 44 |
| Figura 2.5 - | Equipamento do LGS para a realização de ensaios de punçoamento dinâmico: (a) vista geral; (b) cone metálico (antes da queda); (c) cone metálico (após a queda); (d) medição da penetração do cone metálico no geossintético. | 45 |
| Figura 2.6 - | Equipamentos do LGS para a realização dos ensaios de: (a) corte directo; (b) corte em plano inclinado; (c) arranque.   | 46 |
| Figura 2.7 - | Equipamento do LGS para a determinação da permeabilidade à água no plano: (a) vista geral; (b) pormenor do equipamento.  | 47 |
| Figura 2.8 - | Equipamento do LGS para a realização de ensaios de danificação durante a instalação: (a) vista de frente; (b) vista lateral; (c) equipamento durante o ensaio de um geossintético.   | 49 |
| Figura 2.9 - | Equipamento do LGS para simular os danos provocados pela abrasão.  | 49 |

### Capítulo 3 - Durabilidade dos geossintéticos

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Figura 3.1 -  | Extracção dos aditivos por lixiviação e por volatilização.  | 52 |
| Figura 3.2 -  | Reacção de despolimerização do polietileno tereftalato por hidrólise.   | 54 |
| Figura 3.3 -  | Degradação dos polímeros por oxidação.  | 56 |
| Figura 3.4 -  | Estados de oxidação do PEAD estabilizado.   | 56 |
| Figura 3.5 -  | Mecanismo de oxidação do polipropileno.   | 58 |
| Figura 3.6 -  | Espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra.  | 59 |
| Figura 3.7 -  | Espectros da radiação solar no Inverno e no Verão.  | 60 |
| Figura 3.8 -  | Modo de acção dos antioxidantes primários.  | 66 |
| Figura 3.9 -  | Fórmula de estrutura do BHT (2,6-di- <i>t</i> -butil-4-metilfenol).   | 66 |
| Figura 3.10 - | Modo de acção dos antioxidantes secundários.  | 67 |
| Figura 3.11 - | Fórmulas de estrutura de alguns antioxidantes secundários:<br>(a) Irgafos 38 (fosfito); (b) Irgafos 168 (fosfito); (c) Irganox PS 800 (tioéster). | 67 |
| Figura 3.12 - | Fórmula de estrutura do Irganox MD-1024.  | 67 |
| Figura 3.13 - | Modo de acção dos <i>UV absorbers</i> .   | 68 |
| Figura 3.14 - | Fórmulas de estrutura de alguns <i>UV absorbers</i> :<br>(a) 2-hidroxi-4-metoxibenzofenona; (b) Chimassorb 81; (c) Tinuvin 326.                   | 69 |
| Figura 3.15 - | Modo de acção dos <i>quenchers</i> .  | 69 |
| Figura 3.16 - | Fórmula de estrutura de um <i>quencher</i> .  | 69 |
| Figura 3.17 - | Fórmula de estrutura da 2,2,6,6-tetrametilpiperidina.   | 70 |
| Figura 3.18 - | Fórmulas de estrutura de algumas HALS:<br>(a) Tinuvin 765; (b) Tinuvin 770; (c) Chimassorb 2020.  | 70 |
| Figura 3.19 - | Modo de acção das HALS - ciclo de Denisov.  | 71 |
| Figura 3.20 - | Fórmula de estrutura do Chimassorb 944.   | 73 |
| Figura 3.21 - | Fórmula de estrutura do Tinuvin 622.  | 76 |
| Figura 3.22 - | Partículas de negro de carbono.   | 77 |
| Figura 3.23 - | Fórmulas de estrutura das ftalocianinas de cobre: (a) ftalocianina de cobre azul; (b) ftalocianina de cobre verde.                                | 78 |



|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 3.24 - | Equipamento desenvolvido no <i>Federal Institute for Materials Research and Testing</i> para expor os geossintéticos a pressões elevadas de oxigénio: (a) dois autoclaves; (b) esquema de um autoclave. | 82  |
| Figura 3.25 - | Curva de DSC de um filme de PE (OIT - 49,6 minutos).  | 83  |
| Figura 3.26 - | Comparação do espectro das lâmpadas de xénon (equipadas com filtros adequados) com o espectro da luz solar (pico de radiação solar em Miami - Estados Unidos).  | 87  |
| Figura 3.27 - | Comparação do espectro das lâmpadas fluorescentes UVA-340 e UVB FS-40 com o espectro da luz solar (pico de radiação solar em Miami - Estados Unidos).   | 88  |
| Figura 3.28 - | Estação de exposição de Miami da <i>ATLAS - Material Testing Solutions</i> .  | 91  |
| Figura 3.29 - | Tipos de exposição aos agentes climatéricos reais: (a) exposição directa; (b) exposição debaixo de vidro; (c) exposição em caixa negra; (d) exposição com <i>sun-tracking</i> .                         | 93  |
| Figura 3.30 - | Estrutura e modo de funcionamento de um microscópio electrónico de varrimento.  | 98  |
| Figura 3.31 - | Resultados da interacção do feixe electrónico com a amostra.  | 99  |
| Figura 3.32 - | Processo de emissão de raios X e de electrões Auger.  | 100 |
| Figura 3.33 - | Tipos de vibrações moleculares.   | 103 |
| Figura 3.34 - | Representação esquemática dos componentes de um sistema de cromatografia líquida de alta eficiência.  | 105 |
| Figura 3.35 - | Cromatograma ilustrativo da separação de uma mistura de dois componentes, A e B, com diferentes interacções com a fase estacionária da coluna cromatográfica.   | 107 |

## PARTE II

### Capítulo 4 - Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis nos diversos ensaios de durabilidade

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Figura 4.1 - | Determinação da massa por unidade de área de um geotêxtil: (a) medição de um provete; (b) pesagem de um provete.   | 113 |
| Figura 4.2 - | Equipamento utilizado para a determinação da espessura dos geossintéticos: (a) equipamento fechado; (b) equipamento aberto (sem nenhum peso); (c) equipamento durante a determinação da espessura de um geotêxtil.   | 115 |
| Figura 4.3 - | Peso de 2 kPa usado para a determinação da espessura nominal dos geotêxteis: (a) aspecto geral do peso; (b) peso instalado no medidor de espessura.  | 115 |
| Figura 4.4 - | Equipamento usado nos ensaios de tracção-extensão.   | 117 |
| Figura 4.5 - | Garras disponíveis no Laboratório de Geossintéticos da FEUP (protótipos): (a) garras de compressão hidráulica; (b) garras de compressão pneumática; (c) garras cilíndricas; (d) garras em cunha metálica; (e) garras em cunha metálica com face de borracha. | 119 |
| Figura 4.6 - | Células de carga: (a) células de 5 kN e 10 kN; (b) célula instalada no equipamento.  | 119 |
| Figura 4.7 - | Aspecto de um provete para o ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319: (a) esquema do provete; (b) provete de um geotêxtil (com identificação do material e indicação da direcção de fabrico).                                       | 120 |
| Figura 4.8 - | Sistema de medição da extensão por via óptica: (a) provete com os pontos de referência; (b) régua de calibração; (c) aplicação de controlo do vídeo-extensómetro.  | 121 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 4.9 -  | Ensaio de tracção-extensão de um geotêxtil segundo a norma NP EN ISO 10319: (a) início do ensaio; (b), (c) e (d) durante o ensaio; (e) final do ensaio; (f) aspecto do provete após o ensaio.   | 122 |
| Figura 4.10 - | Curva típica força-extensão com indicação da rigidez secante.   | 124 |
| Figura 4.11 - | Curvas típicas força-extensão com indicação da robustez.  | 125 |
| Figura 4.12 - | Curvas força-extensão individuais e curva força-extensão média dos 5 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.  | 126 |
| Figura 4.13 - | Aspecto de um provete para o ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3: (a) esquema do provete; (b) provetes de um geotêxtil.  | 129 |
| Figura 4.14 - | Ensaio de tracção-extensão de um geotêxtil segundo a norma NP EN 29073-3: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) final do ensaio.  | 129 |
| Figura 4.15 - | Aspecto de um provete para o ensaio de rasgamento de acordo com a norma ASTM D4533: (a) esquema do provete; (b) provete de um geotêxtil (com identificação do material e indicação da direcção de fabrico).   | 130 |
| Figura 4.16 - | Ensaio de rasgamento de um geotêxtil segundo a norma ASTM D4533: (a) início do ensaio; (b) e (c) durante o ensaio; (d) final do ensaio.   | 131 |
| Figura 4.17 - | Curvas de rasgamento individuais e curva de rasgamento média dos 10 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.   | 133 |
| Figura 4.18 - | Argolas usadas para a fixação dos provetes no ensaio de punçoamento estático: (a) argola inferior e argola superior; (b) argolas sobrepostas.   | 134 |
| Figura 4.19 - | Pilão usado no ensaio de punçoamento estático: (a) vista geral do pilão; (b) pormenor da base do pilão (bordas arredondadas).   | 135 |
| Figura 4.20 - | Aspecto dos provetes usados no ensaio de punçoamento estático segundo a norma NP EN ISO 12236: (a) aspecto de um provete; (b) provete fixado entre as argolas.  | 135 |
| Figura 4.21 - | Ensaio de punçoamento estático de um geotêxtil segundo a norma NP EN ISO 12236: (a) antes do ensaio; (b) início do ensaio; (c) durante o ensaio; (d) final do ensaio; (e) aspecto do provete após o ensaio.   | 136 |
| Figura 4.22 - | Curvas força-deslocamento individuais e curva força-deslocamento média dos 5 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.  | 137 |
| Figura 4.23 - | Equipamento protótipo usado para a determinação da permeabilidade à água (normal ao plano): (a) vista geral do equipamento; (b) pormenor de uma parte do equipamento.   | 139 |
| Figura 4.24 - | Equipamento protótipo usado para a determinação da permeabilidade à água (normal ao plano): (a), (b) e (c) sistema de medição e controlo da perda de carga hidráulica; (d) local de colocação dos provetes; (e) suporte em arame e um provete; (f) provete colocado no equipamento. | 139 |
| Figura 4.25 - | Curvas de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ obtidas para cada um dos provetes intactos do geotêxtil B0-280.  | 142 |
| Figura 4.26 - | Microscópio electrónico de varrimento usado neste trabalho: (a) vista geral do microscópio; (b) pormenor da parte principal do microscópio.   | 143 |
| Figura 4.27 - | Equipamento usado para o revestimento das amostras com ouro: (a) vista geral do equipamento; (b) pormenor da cápsula de revestimento.   | 144 |
| Figura 4.28 - | Amostras dos geotêxteis para MEV e para microanálise por raio X: (a) vários amostradores; (b) amostrador com um geotêxtil; (c) amostrador com pó e fibras libertadas por um geotêxtil degradado; amostrador antes (d) e após (e) o revestimento.                                    | 144 |
| Figura 4.29 - | Imagem obtida por MEV de uma fibra de PP: (1) barra de escala; (2) tipo de imagem (SE - electrões secundários, BE - electrões retrodifundidos); (3) ampliação; (4) energia do feixe de electrões ( $E_0$ ); (5) distância de trabalho da lente à amostra (WD).                      | 144 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 4.30 - | Espectrómetro de infravermelho: (a) vista geral; (b) suporte para as pastilhas.   | 145 |
| Figura 4.31 - | Espectro de FTIR obtido para as fibras do geotêxtil B2-500 (fibras intactas).   | 146 |
| Figura 4.32 - | Método desenvolvido para a determinação do aditivo C944 nos geotêxteis: (a) corte das amostras dos geotêxteis; (b) adição de clorofórmio; (c) ampolas antes da extracção por ultra-sons; (d) banho de ultra-sons; (e) filtração dos extractos de clorofórmio; (f) sistema cromatográfico. | 147 |
| Figura 4.33 - | Cromatogramas obtidos para os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500.   | 148 |
| Figura 4.34 - | Curva de calibração do C944 em clorofórmio (método A).  | 149 |
| Figura 4.35 - | Cromatogramas obtidos para as amostras do geotêxtil B4-500 com diferentes massas.   | 150 |
| Figura 4.36 - | Curva de calibração usando diferentes massas de geotêxtil B4-500 (método B).  | 151 |

## **Capítulo 5 - Principais características dos geotêxteis estudados. Amostragem e preparação de provetes**

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 5.1 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup> (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN ISO 10319).   | 159 |
| Figura 5.2 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 500 g.m <sup>-2</sup> (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN ISO 10319).   | 159 |
| Figura 5.3 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis B0-280 e B0-500 na direcção de fabrico e na direcção perpendicular à de fabrico (NP EN ISO 10319).                                   | 161 |
| Figura 5.4 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup> (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN 29073-3).   | 163 |
| Figura 5.5 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 500 g.m <sup>-2</sup> (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN 29073-3).   | 164 |
| Figura 5.6 -  | Curvas médias força-deslocamento obtidas para os geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup> .  | 167 |
| Figura 5.7 -  | Curvas médias força-deslocamento obtidas para os geotêxteis com 500 g.m <sup>-2</sup> .  | 168 |
| Figura 5.8 -  | Curvas médias de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ obtidas para os vários geotêxteis.   | 169 |
| Figura 5.9 -  | Imagens obtidas por MEV de uma amostra intacta do geotêxtil B2-500: (a) x10; (b) x20; (c) x50; (d) x100; (e) x200; (f) x200; (g) x500; (h) x500; (i) x1000; (j) x1000; (k) x2000; (l) x2000. | 170 |
| Figura 5.10 - | Espectro de raio X de uma fibra intacta do geotêxtil B2-500 (zona delimitada a vermelho na Figura 5.9j).   | 171 |
| Figura 5.11 - | Esquema do corte e da identificação dos provetes.  | 172 |

## **Capítulo 6 - Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos**

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 6.1 - | Banho termostatzado: (a) vista exterior; (b) vista interior: resistência de aquecimento.                                    | 176 |
| Figura 6.2 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 180 |
| Figura 6.3 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 182 |
| Figura 6.4 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 183 |
| Figura 6.5 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 184 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 6.6 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.                                     | 188 |
| Figura 6.7 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.                                     | 189 |
| Figura 6.8 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.                                  | 191 |
| Figura 6.9 -  | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após a imersão no meio alcalino V: (a) x1000; (b) x1000; (c) x5000.   | 192 |
| Figura 6.10 - | Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após a imersão no meio alcalino V: (a) zona A (a verde) da Figura 6.9c; (b) zona B (a vermelho) da Figura 6.9c. | 192 |
| Figura 6.11 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.                                  | 193 |
| Figura 6.12 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.                                     | 195 |
| Figura 6.13 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.                                     | 197 |

## **Capítulo 7 - Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação - método do forno**

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 7.1 -  | Equipamento utilizado para expor os geotêxteis ao ensaio de termo-oxidação: (a) vista exterior: forno fechado; (b) vista interior: geotêxteis no interior do forno.       | 200 |
| Figura 7.2 -  | Aspecto dos geotêxteis sem C944 após 11 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) comparação com provete de controlo; (b) pequenos pedaços; (c) materiais transformados em pó. | 202 |
| Figura 7.3 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 204 |
| Figura 7.4 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 205 |
| Figura 7.5 -  | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) x50; (b) x100; (c) x200; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.                        | 206 |
| Figura 7.6 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 208 |
| Figura 7.7 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 209 |
| Figura 7.8 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 211 |
| Figura 7.9 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 212 |
| Figura 7.10 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 215 |
| Figura 7.11 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 216 |
| Figura 7.12 - | Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.  | 217 |
| Figura 7.13 - | Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.  | 217 |
| Figura 7.14 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.   | 220 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 7.15 - | Evolução da resistência residual e da robustez residual do geotêxtil B2-280 durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.   | 221 |
| Figura 7.16 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.   | 223 |
| Figura 7.17 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.  | 224 |
| Figura 7.18 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.  | 226 |
| Figura 7.19 - | Evolução da resistência residual do geotêxtil B0-280 durante os ensaios de termo-oxidação a diferentes temperaturas.  | 227 |
| Figura 7.20 - | Representação de Arrhenius usada para estimar o t50% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.  | 229 |
| Figura 7.21 - | Representação de Arrhenius usada para estimar o t0% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.   | 230 |
| Figura 7.22 - | Comparação do t50% RR e do t0% RR estimados para o geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.  | 231 |
| Figura 7.23 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão.  | 234 |
| Figura 7.24 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.   | 235 |
| Figura 7.25 - | Exposição sucessiva do geotêxtil B2-280 a ácido sulfúrico e à termo-oxidação: (a) forno após 1 dia de exposição a 110 °C; (b) geotêxtil B2-280 após 1 dia de exposição a 110 °C; (c) geotêxtil B2-280 após imersão em ácido sulfúrico (à esquerda) e após 56 dias a 110 °C (à direita). | 236 |
| Figura 7.26 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.  | 237 |
| Figura 7.27 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.  | 239 |
| Figura 7.28 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C.   | 240 |
| Figura 7.29 - | Evolução da resistência residual dos provetes não imersos e dos provetes imersos do geotêxtil B2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.   | 241 |
| Figura 7.30 - | Evolução da robustez residual dos provetes não imersos e dos provetes imersos do geotêxtil B2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.  | 241 |
| Figura 7.31 - | Aspecto do geotêxtil B2-280 antes (à esquerda) e após a imersão em nitrato de ferro (à direita).  | 243 |
| Figura 7.32 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos.   | 244 |
| Figura 7.33 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.  | 246 |
| Figura 7.34 - | Aspecto dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) vista global do forno; (b) degradação sofrida por alguns provetes.  | 247 |
| Figura 7.35 - | Aspecto de alguns provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) provete degradado e líquido amarelo; (b) líquido amarelo.   | 247 |
| Figura 7.36 - | Resíduo solidificado após a diminuição da temperatura do forno: (a) aspecto geral do resíduo sólido; (b) fibras aprisionadas no resíduo sólido.   | 248 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 7.37 - | Imagens obtidas por MEV do resíduo sólido formado nos ensaios de termo-oxidação dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre: (a) x20; (b) x50; (c) x100; (d) x200; (e) x500; (f) x500.         | 248 |
| Figura 7.38 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.   | 250 |
| Figura 7.39 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.   | 252 |
| Figura 7.40 - | Evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em soluções de cátions metálicos) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.                                | 253 |
| Figura 7.41 - | Evolução da robustez residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em soluções de cátions metálicos) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.                                   | 253 |
| Figura 7.42 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 10 g.L <sup>-1</sup> e de termo-oxidação a 110 °C.  | 255 |
| Figura 7.43 - | Evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em nitrato de ferro 5 g.L <sup>-1</sup> e 10 g.L <sup>-1</sup> ) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C. | 256 |
| Figura 7.44 - | Evolução da robustez residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em nitrato de ferro 5 g.L <sup>-1</sup> e 10 g.L <sup>-1</sup> ) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.    | 257 |
| Figura 7.45 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.   | 258 |
| Figura 7.46 - | Evolução da resistência residual dos geotêxteis B2-280 e B4-280 (provetes imersos em nitrato de ferro) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.   | 259 |
| Figura 7.47 - | Evolução da robustez residual dos geotêxteis B2-280 e B4-280 (provetes imersos em nitrato de ferro) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.  | 259 |

## **Capítulo 8 - Desenvolvimento de um novo equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação**

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 8.1 -  | Equipamento protótipo desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação: (a) vista de frente; (b) vista de cima (autoclave fechado); (c) vista de cima (autoclave aberto).  | 262 |
| Figura 8.2 -  | Suportes usados para a colocação dos geossintéticos no interior do autoclave: (a) vista geral dos suportes; (b) suportes com provetes de um geotêxtil.  | 263 |
| Figura 8.3 -  | Esquema do equipamento desenvolvido (vista de frente).  | 264 |
| Figura 8.4 -  | Esquema do equipamento desenvolvido (vista de trás).  | 264 |
| Figura 8.5 -  | Esquema do equipamento desenvolvido (vista de cima, autoclave fechado).   | 265 |
| Figura 8.6 -  | Esquema do equipamento desenvolvido (vista de cima, autoclave aberto).  | 265 |
| Figura 8.7 -  | Componentes instalados na parede superior do autoclave: (a) manómetro; (b) transdutor de pressão; (c) válvula de segurança.   | 266 |
| Figura 8.8 -  | Componentes instalados na parede traseira do autoclave: válvula de ¼ polegadas.   | 267 |
| Figura 8.9 -  | Componentes instalados no interior do autoclave: (a) resistência eléctrica de aquecimento e sonda de temperatura PT100; (b) pormenor da sonda de temperatura PT100.   | 267 |
| Figura 8.10 - | Componentes instalados na unidade de controlo: (a) indicador de pressão (à esquerda) e controlador de temperatura (à direita); (b) botão de alimentação geral (botão verde) e botão de alimentação da resistência eléctrica (botão vermelho). | 268 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| Figura 8.11 -   | Sistema de fecho e estanquicidade da parede superior do autoclave: (a) autoclave sem o vedante; (b) pormenor da ranhura onde o vedante é colocado; (c) autoclave com o vedante; (d) cordão de viton usado como vedante.                          | 270 |
| Figura 8.12 -   | Danos sofridos pelo vedante ao longo do tempo: (a) vedante instalado no autoclave; (b) pormenor de um vedante danificado.  | 270 |
| Figura 8.13 -   | Evolução da temperatura no autoclave durante os ensaios de termo-oxidação.   | 274 |
| Figura 8.14 -   | Evolução da pressão no autoclave durante os ensaios de termo-oxidação.   | 275 |
| Figura 8.15 -   | Aspecto do geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) fibras degradadas no interior do autoclave; (c) aspecto geral dos provetes; (d) pormenor dos danos sofridos pelos provetes. | 276 |
| Figura 8.16 -   | Aspecto do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) provetes no interior do autoclave; (b) aspecto geral dos provetes; (c) pormenor dos danos sofridos por um provete.  | 277 |
| Figura 8.17 -   | Aspecto do geotêxtil B0-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) provetes no interior do autoclave; (c) aspecto geral dos provetes; (d) provetes transformados em pequenos pedaços.         | 278 |
| Figura 8.18 -   | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 279 |
| Figura 8.19 -   | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.   | 280 |
| Figura 8.20 -   | Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x50; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x4000.  | 280 |
| Figura 8.21 -   | Aspecto do geotêxtil B2-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) aspecto geral dos provetes.  | 281 |
| Figura 8.22 -   | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 282 |
| Figura 8.23 -   | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 283 |
| Figura 8.24 -   | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 283 |
| Figura 8.25 -   | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 285 |
| Figura 8.26 -   | Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B4-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000; (d) x2000; (e) x4000; (f) x7000.  | 285 |
| Figura 8.27 -   | Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação no autoclave.   | 286 |
| Figura 8.28 -   | Evolução da robustez residual dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 287 |
| Figura 8.29 -   | Evolução da resistência residual do geotêxtil B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 80 °C: novo método vs método do forno.   | 288 |
| <br><b>Capítulo 9 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados artificialmente</b> |  |     |
| Figura 9.1 -  | Simulador climático QUV: (a) Aspecto exterior do QUV; (b) QUV antes da colocação dos suportes com os geotêxteis (lâmpadas UV); (c) QUV após a colocação dos suportes com os geotêxteis; (d) suportes usados para a colocação dos geotêxteis.     | 292 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 9.2 -  | Distribuição espectral (na região UV) da luz solar, das lâmpadas UVA-340 e das lâmpadas UVB-313 (lâmpadas em condições normais de operação).              | 293 |
| Figura 9.3 -  | Sistema de controlo das lâmpadas do QUV (sistema <i>Solar Eye</i> ): (a) sensores de monitorização das lâmpadas UV; (b) painel de informação do sistema.  | 294 |
| Figura 9.4 -  | Sistema de projecção de água existente no QUV: (a) esquema do sistema em operação; (b) aspersores localizados entre as lâmpadas UV.                       | 294 |
| Figura 9.5 -  | Esquema do sistema de condensação existente no QUV.   | 295 |
| Figura 9.6 -  | Variação da temperatura durante o ensaio climatérico E44.   | 297 |
| Figura 9.7 -  | Aspecto do geotêxtil B0-280 após os ensaios climatéricos no QUV: (a) Ensaio E08; (b) Ensaio E26; (c) Ensaio E44; (d) Ensaio E44 (pormenor de um provete). | 298 |
| Figura 9.8 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climatéricos E08 e E26.   | 299 |
| Figura 9.9 -  | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climatéricos E08 e E26.   | 300 |
| Figura 9.10 - | Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B0-280 após o ensaio climatérico E44: (a) x500; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.      | 301 |
| Figura 9.11 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 303 |
| Figura 9.12 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 304 |
| Figura 9.13 - | Comparação da resistência residual dos geotêxteis B2-280 e B2-500 após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.                                  | 306 |
| Figura 9.14 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E44: (a) x50; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x2000; (f) x5000.                  | 306 |
| Figura 9.15 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E62: (a) x50; (b) x200; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.                  | 307 |
| Figura 9.16 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E80: (a) x200; (b) x500; (c) x1000; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.                | 307 |
| Figura 9.17 - | Imagens obtidas por MEV dos resíduos libertados (fibras degradadas) pelo geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E80: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 308 |
| Figura 9.18 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 309 |
| Figura 9.19 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 310 |
| Figura 9.20 - | Comparação da resistência residual dos geotêxteis B4-280 e B4-500 após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.                                  | 311 |
| Figura 9.21 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climatérico E44: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.  | 312 |
| Figura 9.22 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climatérico E62: (a) x50; (b) x200; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.                  | 313 |
| Figura 9.23 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climatérico E80: (a) x200; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.                 | 313 |
| Figura 9.24 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 315 |
| Figura 9.25 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.  | 316 |
| Figura 9.26 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-280 após o ensaio climatérico E80: (a) x2000; (b) x2000; (c) x5000.   | 317 |



|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 9.27 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 318 |
| Figura 9.28 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 318 |
| Figura 9.29 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 320 |
| Figura 9.30 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 321 |
| Figura 9.31 - | Aspecto do geotêxtil B2-500 após 2000 horas de exposição ao ciclo C44: (a) aspecto geral dos provetes; (b) provete manualmente destruído.           | 322 |
| Figura 9.32 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 323 |
| Figura 9.33 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 324 |
| Figura 9.34 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 327 |
| Figura 9.35 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 328 |
| Figura 9.36 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 330 |
| Figura 9.37 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                            | 331 |
| Figura 9.38 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 332 |
| Figura 9.39 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 332 |
| Figura 9.40 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 334 |
| Figura 9.41 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 335 |
| Figura 9.42 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 336 |
| Figura 9.43 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 337 |
| Figura 9.44 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.                  | 338 |
| Figura 9.45 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.   | 340 |
| Figura 9.46 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.   | 341 |
| Figura 9.47 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.   | 342 |
| Figura 9.48 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.   | 343 |
| Figura 9.49 - | Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.                    | 344 |
| Figura 9.50 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.                                 | 349 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 9.51 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão a 90°C.  | 350 |
| Figura 9.52 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV.             | 352 |
| Figura 9.53 - | Aspecto dos provetes do geotêxtil B2-500 imersos em ácido sulfúrico, a 90 °C, após a exposição aos agentes climáticos no QUV.  | 353 |
| Figura 9.54 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos no QUV.                            | 354 |
| Figura 9.55 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de cátions metálicos.  | 357 |
| Figura 9.56 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV. | 359 |
| Figura 9.57 - | Espectros de FTIR obtidos para as fibras do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.                                | 361 |
| Figura 9.58 - | Absorvância a 1720 cm <sup>-1</sup> das fibras dos geotêxteis B2-500 e B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.               | 361 |
| Figura 9.59 - | Relação existente entre a absorvância a 1720 cm <sup>-1</sup> e a resistência residual ou robustez residual dos geotêxteis de PP.  | 362 |
| Figura 9.60 - | Evolução do teor de C944 <i>versus</i> evolução da absorvância a 1720 cm <sup>-1</sup> durante a exposição do geotêxtil B4-500 aos agentes climáticos no QUV.                    | 363 |

#### Capítulo 10 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Figura 10.1 -  | Local de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) mapa com indicação da localização geográfica; (b) imagem de satélite do local de exposição.   | 366 |
| Figura 10.2 -  | Esquema das estruturas metálicas usadas para expor os geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) estrutura do tipo I; (b) estrutura do tipo II.   | 366 |
| Figura 10.3 -  | Estruturas metálicas usadas para expor os geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) vista geral de uma estrutura (tipo II); (b) pormenor de uma unidade da estrutura.  | 367 |
| Figura 10.4 -  | Geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais: (a) vista geral das 4 estruturas metálicas; (b) vista geral da estrutura metálica do tipo I; (c) pormenor de uma unidade da estrutura metálica do tipo I; (d) pormenor do sistema de fixação dos provetes à estrutura metálica. | 368 |
| Figura 10.5 -  | Temperatura média diária entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.   | 370 |
| Figura 10.6 -  | Radiação solar global (300 nm a 3000 nm) acumulada mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007 (valores inexistentes para Outubro de 2006).  | 371 |
| Figura 10.7 -  | Precipitação acumulada mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.  | 371 |
| Figura 10.8 -  | Humidade relativa média mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.   | 371 |
| Figura 10.9 -  | Velocidade do vento média mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.   | 372 |
| Figura 10.10 - | Aspecto dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais.  | 373 |
| Figura 10.11 - | Aspecto dos geotêxteis após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxtil B0-500; (b) espessura do geotêxtil B0-500; (c) espessura do geotêxtil B2-500.   | 374 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 10.12 - Aspecto do geotêxtil B0-280 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) aspecto geral de um provete; (b) provete com luz de fundo (para realçar a falta de fibras).  | 375 |
| Figura 10.13 - Aspecto dos geotêxteis B0-280 e B0-500 após 21 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxteis B0-280 (fila de cima) e B0-500 (fila de baixo) nos suportes metálicos; (b) geotêxtil B0-280; (c) geotêxtil B0-500. | 375 |
| Figura 10.14 - Aspecto do geotêxtil B0-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) aspecto geral dos provetes; (b) provete com orifícios; (c) restos de um provete.   | 377 |
| Figura 10.15 - Aspecto dos geotêxteis após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxtil B4-500 com verdete; (b) geotêxtil P2-500 com musgo e verdete.   | 377 |
| Figura 10.16 - Aspecto dos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 378 |
| Figura 10.17 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.  | 379 |
| Figura 10.18 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.  | 381 |
| Figura 10.19 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B2-280 e P2-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.  | 383 |
| Figura 10.20 - Comparação da variação da espessura dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.  | 385 |
| Figura 10.21 - Comparação da variação da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.  | 387 |
| Figura 10.22 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 390 |
| Figura 10.23 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 392 |
| Figura 10.24 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 393 |
| Figura 10.25 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 395 |
| Figura 10.26 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 397 |
| Figura 10.27 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 399 |
| Figura 10.28 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 401 |
| Figura 10.29 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 403 |
| Figura 10.30 - Evolução da resistência à tracção residual dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 durante a exposição aos agentes climáticos reais.   | 404 |
| Figura 10.31 - Evolução da resistência à tracção residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.   | 404 |
| Figura 10.32 - Evolução da resistência ao rasgamento residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.   | 407 |
| Figura 10.33 - Evolução da resistência ao punção estático residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.  | 409 |

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Figura 10.34 - | Curvas médias de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 410 |
| Figura 10.35 - | Curvas médias de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 412 |
| Figura 10.36 - | Curvas médias de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 413 |
| Figura 10.37 - | Curvas médias de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 415 |
| Figura 10.38 - | Evolução da $v_{20}$ H50 dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.  | 416 |
| Figura 10.39 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x200; (b) x500; (c) x1000; (d) x1000; (e) x2000; (f) x5000.                                    | 417 |
| Figura 10.40 - | Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.39f): (a) zona A; (b) zona B.   | 418 |
| Figura 10.41 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x20; (b) x50; (c) x100; (d) x200; (e) x500; (f) x1000; (g) x500; (h) x1000; (i) x1000.        | 418 |
| Figura 10.42 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 (lado oposto ao de exposição) após 12 meses de exposição: (a) x100; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x2000; (f) x2000.                                   | 420 |
| Figura 10.43 - | Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.42d): (a) zona C; (b) zona D.  | 420 |
| Figura 10.44 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x20; (b) x100; (c) x200; (d) x500; (e) x500; (f) x500; (g) x1000; (h) x1000; (i) x1000.       | 421 |
| Figura 10.45 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x2000; (c) x2000.   | 422 |
| Figura 10.46 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 422 |
| Figura 10.47 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.   | 422 |
| Figura 10.48 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 423 |
| Figura 10.49 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 423 |
| Figura 10.50 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.   | 423 |
| Figura 10.51 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.   | 424 |
| Figura 10.52 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.   | 425 |
| Figura 10.53 - | Imagens obtidas por MEV de uma fibra do geotêxtil B4-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (x1000): (a) imagem de electrões secundários; (b) imagem de electrões rectrodifundidos. | 425 |
| Figura 10.54 - | Mapas de raio X de uma fibra do geotêxtil B4-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (zona assinalada a vermelho na Figura 10.53a): (a) carbono; (b) oxigénio; (c) silício.          | 426 |
| Figura 10.55 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.   | 426 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Figura 10.56 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.   | 427 |
| Figura 10.57 - | Espectros de raio X do geotêxtil B4-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.56c): (a) zona F; (b) zona G.   | 427 |
| Figura 10.58 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 428 |
| Figura 10.59 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 428 |
| Figura 10.60 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x200; (b) x1000; (c) x2000.   | 428 |
| Figura 10.61 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.  | 429 |
| Figura 10.62 - | Mapas de raio X de uma fibra do geotêxtil P2-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (zona assinalada a vermelho na Figura 10.61c): (a) carbono; (b) oxigénio; (c) silício; (d) cálcio. | 429 |
| Figura 10.63 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.  | 430 |
| Figura 10.64 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 430 |
| Figura 10.65 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 431 |
| Figura 10.66 - | Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.  | 431 |
| Figura 10.67 - | Cromatogramas obtidos para o geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.   | 432 |
| Figura 10.68 - | Evolução do teor de C944 nos geotêxteis B2-500 e B4-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.   | 432 |
| Figura 10.69 - | Decaimento exponencial (cinética de primeira ordem) do teor de C944 nas amostras do geotêxtil B4-500 expostas aos agentes climáticos reais.   | 433 |

## Capítulo 11 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Figura 11.1 - | Processo de instalação dos geotêxteis a 5 cm de profundidade: (a) cova escavada para a colocação do geotêxtil; (b) fase inicial da cobertura do geotêxtil com solo; (c) fase final da cobertura do geotêxtil com solo; (d) geotêxtil totalmente coberto com solo. | 438 |
| Figura 11.2 - | Processo de exumação dos geotêxteis enterrados a 5 cm de profundidade: (a) e (b) remoção do solo; (c) remoção do geotêxtil; (d) aspecto do geotêxtil após a exumação.   | 438 |
| Figura 11.3 - | Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 6 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo e da vegetação; (c) e (d) pormenor de algumas raízes existentes no material.  | 441 |
| Figura 11.4 - | Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 6 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo.   | 441 |
| Figura 11.5 - | Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 6 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo e da vegetação; (b) e (c) pormenor de algumas raízes; (d) pormenor de uma raiz que atravessou o material.                                     | 442 |
| Figura 11.6 - | Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 6 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo.   | 442 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Figura 11.7 -  | Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 12 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo e de alguma vegetação.                   | 443 |
| Figura 11.8 -  | Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 12 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo; (b) pormenor de algumas raízes existentes no material.     | 443 |
| Figura 11.9 -  | Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 12 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo e vegetação; (b) pormenor de uma raiz existente no material. | 443 |
| Figura 11.10 - | Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 12 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo; (b) pormenor de uma raiz existente no material.            | 444 |
| Figura 11.11 - | Túneis escavados por roedores e/ou toupeiras no solo abaixo dos geotêxteis: (a) aspecto geral do solo após a exumação de um geotêxtil; (b) pormenor de um túnel.                  | 444 |
| Figura 11.12 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 445 |
| Figura 11.13 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.   | 447 |
| Figura 11.14 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 448 |
| Figura 11.15 - | Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.   | 449 |

### PARTE III

#### Capítulo 12 - Resistência de georredes de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Figura 12.1 -  | Georredes de PEAD produzidas: (a) georrede B0; (b) georrede P0; (c) georrede V0.   | 456 |
| Figura 12.2 -  | Curvas médias força-extensão obtidas para as diferentes georredes (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN ISO 13934-1).             | 459 |
| Figura 12.3 -  | Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                 | 460 |
| Figura 12.4 -  | Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                 | 462 |
| Figura 12.5 -  | Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                                   | 464 |
| Figura 12.6 -  | Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                                   | 465 |
| Figura 12.7 -  | Curvas médias força-extensão da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                                   | 466 |
| Figura 12.8 -  | Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                                   | 468 |
| Figura 12.9 -  | Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                                   | 469 |
| Figura 12.10 - | Curvas médias força-extensão das georredes B0 e B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.                      | 471 |
| Figura 12.11 - | Aspecto da georrede B0 após 2000 horas de exposição no QUV: (a), (b) e (c) aspecto dos provetes; (d) provete transformado em pequenos pedaços. | 473 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Figura 12.12 - | Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.                          | 474 |
| Figura 12.13 - | Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.                          | 476 |
| Figura 12.14 - | Curvas médias força-extensão da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.                          | 478 |
| Figura 12.15 - | Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.                          | 480 |
| Figura 12.16 - | Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.                          | 481 |
| Figura 12.17 - | Georredes expostas aos agentes climáticos reais: (a) e (b) vista geral de vários provetes expostos; (c) pormenor de alguns provetes da georrede V0. | 482 |
| Figura 12.18 - | Temperatura média diária entre Abril de 2007 e Abril de 2009.   | 483 |
| Figura 12.19 - | Radiação solar global (300 nm a 3000 nm) acumulada mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.  | 484 |
| Figura 12.20 - | Precipitação acumulada mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.  | 484 |
| Figura 12.21 - | Velocidade do vento média mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.   | 484 |
| Figura 12.22 - | Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.                               | 486 |
| Figura 12.23 - | Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.                               | 488 |
| Figura 12.24 - | Curvas médias força-extensão da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.                               | 490 |
| Figura 12.25 - | Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.                               | 491 |
| Figura 12.26 - | Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.                               | 492 |

### **Capítulo 13 - Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos**

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 13.1 - | Geomembranas estudadas neste trabalho: (a) geomembrana lisa; (b) geomembrana rugosa; (c) geomembrana lisa (imagem de MEV x50); (d) geomembrana rugosa (imagem de MEV x50).         | 496 |
| Figura 13.2 - | Proвете em forma de “halteres” (de acordo com a ASTM D638).  | 497 |
| Figura 13.3 - | Ensaio de tracção-deformação de uma geomembrana segundo a norma ASTM D638: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) provete antes (à esquerda) e após o ensaio (à direita). | 498 |
| Figura 13.4 - | Curva tensão-deformação obtida para a geomembrana lisa.  | 498 |
| Figura 13.5 - | Provetes usados nos ensaios de rasgamento de acordo com a ASTM D1004.  | 500 |
| Figura 13.6 - | Ensaio de rasgamento de uma geomembrana segundo a norma ASTM D1004: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) provete antes (à esquerda) e após o ensaio (à direita).        | 500 |
| Figura 13.7 - | Geomembranas expostas à termo-oxidação.  | 503 |
| Figura 13.8 - | Provetes das geomembranas expostos no QUV: (a) provetes para ensaios de tracção-deformação (ASTM D638); (b) provetes para ensaios de rasgamento (ASTM D1004).                      | 505 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Figura 13.9 - | Geomembranas expostas aos agentes climatéricos reais: (a) vista geral de vários provetes expostos (b) pormenor de alguns provetes expostos (para ensaios de tracção-deformação). | 506 |
|---------------|--|-----|



# Índice de quadros

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>PARTE I</b>   |      |
| <b>Capítulo 1 - Geossintéticos - aspectos gerais</b>   |      |
| Quadro 1.1 - Comparação de algumas propriedades dos polímeros normalmente usados para o fabrico de geossintéticos.   | 15   |
| <b>Capítulo 2 - Normas e ensaios em geossintéticos. Propriedades dos geossintéticos</b>  |      |
| Quadro 2.1 - Grupos de trabalho do CEN TC 189.   | 26   |
| Quadro 2.2 - Normas de terminologia, identificação, amostragem e classificação de geossintéticos com origem no WG2 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009). | 28   |
| Quadro 2.3 - Normas para ensaios hidráulicos de geossintéticos com origem no WG4 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).                                   | 28   |
| Quadro 2.4 - Normas referentes às exigências dos geossintéticos com vista à marcação CE com origem nos WG1 e WG6 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).   | 29   |
| Quadro 2.5 - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos com origem no WG3 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).                                     | 30   |
| Quadro 2.6 - Normas para ensaios de durabilidade de geossintéticos com origem no WG5 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).                               | 31   |
| Quadro 2.7 - Normas ISO com origem na TC 221 (normas activas em Setembro de 2009).   | 32   |
| Quadro 2.8 - Subcomissões da ASTM D35.   | 33   |
| Quadro 2.9 - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.01 (normas activas em Setembro de 2009).                         | 33   |
| Quadro 2.10 - Normas para ensaios de durabilidade de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.02 (normas activas em Setembro de 2009).                  | 34   |
| Quadro 2.11 - Normas para ensaios de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.3 (normas activas em Setembro de 2009).                                   | 35   |
| Quadro 2.12 - Normas para ensaios de geomembranas com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.10 (normas activas em Setembro de 2009).                                    | 36   |
| Quadro 2.13 - Comparação de algumas normas com origem na ISO TC 221, no CEN TC 189 e na ASTM D35 (normas activas em Setembro de 2009).                                 | 38   |
| <b>Capítulo 3 - Durabilidade dos geossintéticos</b>  |      |
| Quadro 3.1 - Características do Chimassorb 944.  | 73   |
| Quadro 3.2 - Características do Tinuvin 622.   | 76   |
| Quadro 3.3 - Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos aos líquidos.                        | 80   |
| Quadro 3.4 - Métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos à oxidação (EN ISO 13438: 2004).  | 82   |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Quadro 3.5 -  | Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.                    | 84  |
| Quadro 3.6 -  | Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação laboratorial da resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos. | 89  |
| Quadro 3.7 -  | Principais características de alguns locais normalmente escolhidos para a exposição de materiais ao envelhecimento climático.                             | 91  |
| Quadro 3.8 -  | Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos reais.        | 95  |
| Quadro 3.9 -  | Regiões do espectro de infravermelho.   | 102 |
| Quadro 3.10 - | Posições características de algumas bandas de absorção no infravermelho.  | 103 |

## PARTE II

### Capítulo 4 - Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis nos diversos ensaios de durabilidade

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Quadro 4.1 -  | Resultados obtidos na determinação da massa por unidade de área de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.  | 113 |
| Quadro 4.2 -  | Resultados finais do ensaio de determinação da massa por unidade de área do geotêxtil B0-280.   | 114 |
| Quadro 4.3 -  | Resultados obtidos na determinação da espessura de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.  | 116 |
| Quadro 4.4 -  | Principais características do equipamento utilizado nos ensaios de tracção-extensão.  | 118 |
| Quadro 4.5 -  | Resultados obtidos para a força máxima, resistência à tracção e extensão na força máxima no ensaio de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.  | 125 |
| Quadro 4.6 -  | Resultados obtidos para a rigidez secante e para a robustez no ensaio de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.   | 127 |
| Quadro 4.7 -  | Resultados obtidos no ensaio de tracção-extensão de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valores médios <i>versus</i> valores calculados a partir da curva média.                     | 127 |
| Quadro 4.8 -  | Resultados obtidos no ensaio de rasgamento de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.   | 132 |
| Quadro 4.9 -  | Resultado obtido no ensaio de rasgamento de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valor médio <i>versus</i> valor calculado a partir da curva média.                                  | 133 |
| Quadro 4.10 - | Resultados obtidos no ensaio de punção estático de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.   | 137 |
| Quadro 4.11 - | Resultados obtidos no ensaio de punção estático de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valores médios <i>versus</i> valores calculados a partir da curva média.                      | 138 |
| Quadro 4.12 - | Dados experimentais recolhidos e velocidades de escoamento $v_{20}$ obtidas no ensaio de permeabilidade à água (normal ao plano) de um provete intacto do geotêxtil B0-280.               | 141 |
| Quadro 4.13 - | Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.   | 141 |
| Quadro 4.14 - | Parâmetros das curvas de regressão quadrática $H = f(v_{20})$ , velocidades de escoamento para uma perda de carga de 50 mm e permissividades dos 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280. | 142 |
| Quadro 4.15 - | Principais características da pré-coluna e da coluna usadas nos ensaios de HPLC-UV para a separação do C944.  | 147 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 4.16 - Áreas e tempos de retenção do C944 obtidos na análise dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 por HPLC-UV. | 148 |
| Quadro 4.17 - Determinação do C944 pelo método da curva de calibração (método A).                                       | 150 |
| Quadro 4.18 - Determinação do C944 nos geotêxteis B2-500 e B4-500 pelo método B.  | 151 |

## **Capítulo 5 - Principais características dos geotêxteis estudados. Amostragem e preparação de provetes**

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 5.1 - Principais características das fibras de PP fabricadas.  | 154 |
| Quadro 5.2 - Principais características dos geotêxteis fabricados.  | 154 |
| Quadro 5.3 - Massa por unidade de área das amostras intactas dos geotêxteis.  | 155 |
| Quadro 5.4 - Espessura das amostras intactas dos geotêxteis.  | 156 |
| Quadro 5.5 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção de fabrico).                 | 157 |
| Quadro 5.6 - Rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e robustez das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção de fabrico).                 | 157 |
| Quadro 5.7 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico). | 160 |
| Quadro 5.8 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção de fabrico).                   | 162 |
| Quadro 5.9 - Rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e robustez das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção de fabrico).                   | 162 |
| Quadro 5.10 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico).  | 165 |
| Quadro 5.11 - Resistência ao rasgamento das amostras intactas dos geotêxteis (valores determinados na direcção de fabrico).   | 165 |
| Quadro 5.12 - Resistência ao rasgamento das amostras intactas dos geotêxteis (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico).   | 166 |
| Quadro 5.13 - Resistência ao punçoamento estático e deslocamento na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis.  | 167 |
| Quadro 5.14 - Velocidades de escoamento $v_{20}$ H70, $v_{20}$ H56, $v_{20}$ H42, $v_{20}$ H28 e $v_{20}$ H14 obtidas para os vários geotêxteis.                                    | 168 |
| Quadro 5.15 - $v_{20}$ H50 médias e $\Psi$ H50 médias obtidas para os vários geotêxteis.  | 169 |

## **Capítulo 6 - Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos**

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 6.1 - Principais características do banho usado nos ensaios de imersão.                          | 176 |
| Quadro 6.2 - Principais características dos reagentes utilizados na preparação das soluções de imersão. | 176 |
| Quadro 6.3 - Ensaios de imersão de acordo com a norma EN 14030.   | 177 |
| Quadro 6.4 - Ensaios de imersão de acordo com a norma EN 12447.   | 177 |
| Quadro 6.5 - Ensaios de imersão a 90 °C em soluções ácidas.   | 178 |
| Quadro 6.6 - Ensaios de imersão a 90 °C em soluções alcalinas.  | 178 |
| Quadro 6.7 - Ensaios de imersão realizados à temperatura ambiente.                                      | 179 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 6.8 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.  | 180 |
| Quadro 6.9 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.                           | 180 |
| Quadro 6.10 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 181 |
| Quadro 6.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.                          | 181 |
| Quadro 6.12 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 182 |
| Quadro 6.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.                          | 182 |
| Quadro 6.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. | 184 |
| Quadro 6.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.                          | 184 |
| Quadro 6.16 - Resistências residuais dos geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup> após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.                                     | 185 |
| Quadro 6.17 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.         | 186 |
| Quadro 6.18 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.                                  | 186 |
| Quadro 6.19 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.         | 188 |
| Quadro 6.20 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.                                  | 189 |
| Quadro 6.21 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.      | 190 |
| Quadro 6.22 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.                               | 190 |
| Quadro 6.23 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.      | 193 |
| Quadro 6.24 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.                               | 193 |
| Quadro 6.25 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.         | 195 |
| Quadro 6.26 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.                                  | 195 |
| Quadro 6.27 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.         | 196 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 6.28 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.            | 196 |
| <b>Capítulo 7 - Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação - método do forno</b>   |     |
| Quadro 7.1 - Principais características do forno utilizado nos ensaios de termo-oxidação.   | 200 |
| Quadro 7.2 - Variação da massa e das dimensões do geotêxtil B0-280 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 201 |
| Quadro 7.3 - Variação da massa e das dimensões do geotêxtil B0-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 202 |
| Quadro 7.4 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.  | 203 |
| Quadro 7.5 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                           | 203 |
| Quadro 7.6 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.  | 204 |
| Quadro 7.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                           | 204 |
| Quadro 7.8 - Variação das dimensões dos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.   | 207 |
| Quadro 7.9 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.  | 207 |
| Quadro 7.10 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 208 |
| Quadro 7.11 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C. | 208 |
| Quadro 7.12 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 209 |
| Quadro 7.13 - Variação das dimensões dos geotêxteis B4-280 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.  | 210 |
| Quadro 7.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C. | 211 |
| Quadro 7.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 211 |
| Quadro 7.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C. | 212 |
| Quadro 7.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 212 |
| Quadro 7.18 - Variação das dimensões dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.  | 214 |
| Quadro 7.19 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C. | 214 |
| Quadro 7.20 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 214 |
| Quadro 7.21 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C. | 215 |
| Quadro 7.22 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.                          | 215 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 7.23 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.   | 219 |
| Quadro 7.24 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.  | 220 |
| Quadro 7.25 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.   | 222 |
| Quadro 7.26 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.  | 222 |
| Quadro 7.27 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.  | 224 |
| Quadro 7.28 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.   | 224 |
| Quadro 7.29 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.  | 225 |
| Quadro 7.30 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.   | 225 |
| Quadro 7.31 - Efeito da temperatura no t50% RR e no t0% RR do geotêxtil B0-280.   | 227 |
| Quadro 7.32 - Parâmetros usados na representação de $[\ln (1/t50\% \text{ RR})]$ em função de $(1/T)$ .   | 228 |
| Quadro 7.33 - Previsão do t50% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.  | 229 |
| Quadro 7.34 - Parâmetros usados na representação de $[\ln (1/t0\% \text{ RR})]$ em função de $(1/T)$ .  | 230 |
| Quadro 7.35 - Previsão do t0% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.   | 230 |
| Quadro 7.36 - Ensaios de imersão em líquidos do geotêxtil B2-280, antes da exposição à termo-oxidação.  | 232 |
| Quadro 7.37 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão.   | 233 |
| Quadro 7.38 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão.   | 233 |
| Quadro 7.39 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.               | 234 |
| Quadro 7.40 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.  | 235 |
| Quadro 7.41 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.    | 236 |
| Quadro 7.42 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.                             | 237 |
| Quadro 7.43 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.      | 238 |
| Quadro 7.44 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.                               | 238 |
| Quadro 7.45 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C. | 239 |
| Quadro 7.46 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C.                          | 240 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| Quadro 7.47 -   | Ensaio de imersão em soluções de cátions metálicos antes da exposição à termo-oxidação.  | 243 |
| Quadro 7.48 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos.   | 244 |
| Quadro 7.49 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos.  | 244 |
| Quadro 7.50 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.                     | 245 |
| Quadro 7.51 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.  | 246 |
| Quadro 7.52 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.                      | 249 |
| Quadro 7.53 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.   | 249 |
| Quadro 7.54 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.                      | 251 |
| Quadro 7.55 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.   | 251 |
| Quadro 7.56 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 10 g.L <sup>-1</sup> e de termo-oxidação a 110 °C. | 254 |
| Quadro 7.57 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 10 g.L <sup>-1</sup> e de termo-oxidação a 110 °C.                          | 255 |
| Quadro 7.58 -   | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.                      | 257 |
| Quadro 7.59 -   | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.   | 258 |
| <br><b>Capítulo 8 - Desenvolvimento de um novo equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação</b> |  |     |
| Quadro 8.1 -  | Dimensões do equipamento protótipo desenvolvido.   | 263 |
| Quadro 8.2 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 278 |
| Quadro 8.3 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.   | 278 |
| Quadro 8.4 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 281 |
| Quadro 8.5 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.   | 282 |
| Quadro 8.6 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 284 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 8.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.  | 284 |
| <b>Capítulo 9 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados artificialmente</b>  |     |
| Quadro 9.1 - Características comuns aos ciclos climáticos C08, C26, C44, C62 e C80.  | 296 |
| Quadro 9.2 - Duração dos passos de exposição à radiação UV, de chuva e de condensação nos diferentes ciclos climáticos.  | 296 |
| Quadro 9.3 - Radiação total incidente (500 horas) durante os diferentes ensaios climáticos.  | 297 |
| Quadro 9.4 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.            | 298 |
| Quadro 9.5 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                     | 299 |
| Quadro 9.6 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.            | 300 |
| Quadro 9.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                     | 300 |
| Quadro 9.8 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.            | 302 |
| Quadro 9.9 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                     | 303 |
| Quadro 9.10 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 303 |
| Quadro 9.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                    | 304 |
| Quadro 9.12 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 309 |
| Quadro 9.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                    | 309 |
| Quadro 9.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 310 |
| Quadro 9.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                    | 310 |
| Quadro 9.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 314 |
| Quadro 9.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                    | 314 |
| Quadro 9.18 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.           | 315 |
| Quadro 9.19 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.                                    | 315 |
| Quadro 9.20 - Ciclo climático C44.   | 319 |
| Quadro 9.21 - Número de ciclos C44 e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.   | 319 |
| Quadro 9.22 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 320 |



|  |     |
|--|-----|
| Quadro 9.23 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 320 |
| Quadro 9.24 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 321 |
| Quadro 9.25 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 321 |
| Quadro 9.26 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 323 |
| Quadro 9.27 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 323 |
| Quadro 9.28 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 324 |
| Quadro 9.29 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 324 |
| Quadro 9.30 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 326 |
| Quadro 9.31 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 326 |
| Quadro 9.32 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 327 |
| Quadro 9.33 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 327 |
| Quadro 9.34 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 329 |
| Quadro 9.35 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 329 |
| Quadro 9.36 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. | 330 |
| Quadro 9.37 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.                          | 330 |
| Quadro 9.38 - Ciclo climático usado nos ensaios UV50, UV60 e UV70.   | 333 |
| Quadro 9.39 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.                  | 333 |
| Quadro 9.40 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 334 |
| Quadro 9.41 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.                  | 334 |
| Quadro 9.42 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 335 |
| Quadro 9.43 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.                  | 336 |
| Quadro 9.44 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.   | 336 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 9.45 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.  | 337 |
| Quadro 9.46 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.   | 337 |
| Quadro 9.47 - Irradiância e radiação total incidente dos ensaios climatéricos R68, R87 e R103.   | 339 |
| Quadro 9.48 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.  | 339 |
| Quadro 9.49 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.   | 340 |
| Quadro 9.50 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.  | 340 |
| Quadro 9.51 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.   | 341 |
| Quadro 9.52 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.  | 342 |
| Quadro 9.53 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.   | 342 |
| Quadro 9.54 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.  | 343 |
| Quadro 9.55 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.   | 343 |
| Quadro 9.56 - Ciclo climatérico usado nos ensaios segundo a norma NP EN 12224.   | 345 |
| Quadro 9.57 - Resistência residual e robustez residual dos geotêxteis com 280 g.m <sup>-2</sup> após o ensaio climatérico de acordo com a norma NP EN 12224.   | 345 |
| Quadro 9.58 - Resistência residual e robustez residual dos geotêxteis com 500 g.m <sup>-2</sup> após o ensaio climatérico de acordo com a norma NP EN 12224.   | 346 |
| Quadro 9.59 - Ensaio de imersão a 90 °C do geotêxtil B2-500 antes da exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 346 |
| Quadro 9.60 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente do geotêxtil B2-500 antes da exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 347 |
| Quadro 9.61 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão à temperatura ambiente.   | 348 |
| Quadro 9.62 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.   | 348 |
| Quadro 9.63 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão a 90 °C.  | 349 |
| Quadro 9.64 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão a 90 °C.  | 349 |
| Quadro 9.65 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climatéricos no QUV. | 351 |
| Quadro 9.66 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climatéricos no QUV.                          | 351 |
| Quadro 9.67 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climatéricos no QUV.                | 353 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 9.68 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos no QUV.  | 353 |
| Quadro 9.69 - Ensaio de imersão em soluções de cátions metálicos antes da exposição aos agentes climáticos no QUV.  | 355 |
| Quadro 9.70 - Resistência à tração, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de cátions metálicos.  | 356 |
| Quadro 9.71 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de cátions metálicos.  | 356 |
| Quadro 9.72 - Resistência à tração, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV. | 358 |
| Quadro 9.73 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV.                         | 358 |
| Quadro 9.74 - Número de ciclos C44 e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.  | 360 |

## **Capítulo 10 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais**

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 10.1 - Calendário de recolha dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais.   | 369 |
| Quadro 10.2 - Ensaio realizado para a caracterização física, mecânica e hidráulica dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais.  | 369 |
| Quadro 10.3 - Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total, humidade relativa média e velocidade do vento média durante os vários tempos de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais. | 373 |
| Quadro 10.4 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 378 |
| Quadro 10.5 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 380 |
| Quadro 10.6 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 382 |
| Quadro 10.7 - Evolução da espessura dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 384 |
| Quadro 10.8 - Evolução da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 386 |
| Quadro 10.9 - Evolução da espessura dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.   | 388 |
| Quadro 10.10 - Resistência à tração, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 389 |
| Quadro 10.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 389 |
| Quadro 10.12 - Resistência à tração, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 391 |
| Quadro 10.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.  | 391 |

|   |     |
|---|-----|
| Quadro 10.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 393 |
| Quadro 10.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 393 |
| Quadro 10.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 394 |
| Quadro 10.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 395 |
| Quadro 10.18 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 396 |
| Quadro 10.19 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 397 |
| Quadro 10.20 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 398 |
| Quadro 10.21 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 399 |
| Quadro 10.22 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 400 |
| Quadro 10.23 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 401 |
| Quadro 10.24 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 402 |
| Quadro 10.25 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 402 |
| Quadro 10.26 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.         | 405 |
| Quadro 10.27 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.         | 406 |
| Quadro 10.28 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.         | 406 |
| Quadro 10.29 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.         | 406 |
| Quadro 10.30 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                              | 408 |
| Quadro 10.31 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                              | 408 |
| Quadro 10.32 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                              | 408 |
| Quadro 10.33 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                              | 408 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Quadro 10.34 - | Velocidades de escoamento $v_{20}$ H70, $v_{20}$ H56, $v_{20}$ H42, $v_{20}$ H28 e $v_{20}$ H14 do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 410 |
| Quadro 10.35 - | $v_{20}$ H50 médias e $\Psi$ H50 médias do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.   | 411 |
| Quadro 10.36 - | Velocidades de escoamento $v_{20}$ H70, $v_{20}$ H56, $v_{20}$ H42, $v_{20}$ H28 e $v_{20}$ H14 do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 412 |
| Quadro 10.37 - | $v_{20}$ H50 médias e $\Psi$ H50 médias do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.   | 412 |
| Quadro 10.38 - | Velocidades de escoamento $v_{20}$ H70, $v_{20}$ H56, $v_{20}$ H42, $v_{20}$ H28 e $v_{20}$ H14 do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 413 |
| Quadro 10.39 - | $v_{20}$ H50 médias e $\Psi$ H50 médias do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.   | 414 |
| Quadro 10.40 - | Velocidades de escoamento $v_{20}$ H70, $v_{20}$ H56, $v_{20}$ H42, $v_{20}$ H28 e $v_{20}$ H14 do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 414 |
| Quadro 10.41 - | $v_{20}$ H50 médias e $\Psi$ H50 médias do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.   | 415 |

#### Capítulo 11 - Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Quadro 11.1 -  | Resultados das análises às amostras de solo recolhidas a 5 cm de profundidade.  | 440 |
| Quadro 11.2 -  | Resultados das análises às amostras de solo recolhidas a 25 cm de profundidade.   | 440 |
| Quadro 11.3 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 445 |
| Quadro 11.4 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.                           | 445 |
| Quadro 11.5 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm. | 446 |
| Quadro 11.6 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.                          | 446 |
| Quadro 11.7 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 447 |
| Quadro 11.8 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.                           | 447 |
| Quadro 11.9 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm. | 448 |
| Quadro 11.10 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.                          | 449 |

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Quadro 11.11 - | Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 450 |
| Quadro 11.12 - | Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm. | 450 |
| Quadro 11.13 - | Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.  | 451 |
| Quadro 11.14 - | Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm. | 451 |

### PARTE III

#### Capítulo 12 - Resistência de georredes de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos

|                |  |     |
|----------------|--|-----|
| Quadro 12.1 -  | Características comuns a todas as georredes de PEAD.   | 455 |
| Quadro 12.2 -  | Composição química das georredes de PEAD.  | 456 |
| Quadro 12.3 -  | Condições experimentais dos ensaios de tracção-extensão (NP EN ISO 13934-1).   | 457 |
| Quadro 12.4 -  | Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas das georredes (NP EN ISO 13934-1) (valores determinados na direcção de fabrico).                  | 458 |
| Quadro 12.5 -  | Rigidez secante (a 2%, 5% e 10%) e robustez das amostras intactas das georredes (NP EN ISO 13934-1) (valores determinados na direcção de fabrico).                       | 458 |
| Quadro 12.6 -  | Condições experimentais dos ensaios de imersão das georredes.  | 459 |
| Quadro 12.7 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio. | 460 |
| Quadro 12.8 -  | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                          | 460 |
| Quadro 12.9 -  | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio. | 461 |
| Quadro 12.10 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                          | 461 |
| Quadro 12.11 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                   | 463 |
| Quadro 12.12 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.  | 463 |
| Quadro 12.13 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                   | 464 |
| Quadro 12.14 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.  | 465 |
| Quadro 12.15 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.                   | 466 |
| Quadro 12.16 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.  | 466 |

|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Quadro 12.17 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.  | 467 |
| Quadro 12.18 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.   | 467 |
| Quadro 12.19 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.  | 468 |
| Quadro 12.20 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.   | 468 |
| Quadro 12.21 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.   | 470 |
| Quadro 12.22 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.  | 470 |
| Quadro 12.23 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.   | 470 |
| Quadro 12.24 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.  | 470 |
| Quadro 12.25 - | Ciclo climatérico a que as georredes foram expostas no QUV.   | 472 |
| Quadro 12.26 - | Número de ciclos climatéricos e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição das georredes aos agentes climatéricos no QUV.  | 473 |
| Quadro 12.27 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 474 |
| Quadro 12.28 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 474 |
| Quadro 12.29 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 476 |
| Quadro 12.30 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 476 |
| Quadro 12.31 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 477 |
| Quadro 12.32 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 478 |
| Quadro 12.33 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 479 |
| Quadro 12.34 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 479 |
| Quadro 12.35 - | Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.  | 480 |
| Quadro 12.36 - | Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos no QUV.   | 481 |
| Quadro 12.37 - | Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total e velocidade do vento média a que as georredes estiveram sujeitas durante os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 485 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 12.38 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 486 |
| Quadro 12.39 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 486 |
| Quadro 12.40 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 487 |
| Quadro 12.41 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 488 |
| Quadro 12.42 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 489 |
| Quadro 12.43 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 489 |
| Quadro 12.44 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 490 |
| Quadro 12.45 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 491 |
| Quadro 12.46 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 492 |
| Quadro 12.47 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.                          | 492 |

### **Capítulo 13 - Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos**

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 13.1 - Condições experimentais dos ensaios de tracção-deformação (ASTM D638).   | 497 |
| Quadro 13.2 - Determinação da área de secção mínima de um provete da geomembrana lisa.   | 499 |
| Quadro 13.3 - Determinação da tensão na cedência dos 5 provetes da geomembrana lisa.   | 499 |
| Quadro 13.4 - Resultados obtidos nos ensaios de tracção-deformação de 5 provetes intactos da geomembrana lisa de acordo com a norma ASTM D638.                               | 499 |
| Quadro 13.5 - Condições experimentais dos ensaios de rasgamento (ASTM D1004).  | 500 |
| Quadro 13.6 - Parâmetros mecânicos das amostras de referência das geomembranas determinados de acordo com as normas ASTM D638 e ASTM D1004 (valores na direcção de fabrico). | 501 |
| Quadro 13.7 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                                    | 502 |
| Quadro 13.8 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.                                  | 502 |
| Quadro 13.9 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo método do forno.   | 504 |
| Quadro 13.10 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo método do forno.  | 504 |
| Quadro 13.11 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após a exposição aos agentes climatéricos simulados no QUV.   | 505 |
| Quadro 13.12 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após a exposição aos agentes climatéricos simulados no QUV.   | 506 |



|                |   |     |
|----------------|---|-----|
| Quadro 13.13 - | Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total, humidade relativa média e velocidade do vento média a que as geomembranas estiveram sujeitas durante os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos reais. | 507 |
| Quadro 13.14 - | Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.  | 508 |
| Quadro 13.15 - | Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.  | 508 |



# Abreviaturas e símbolos

## Alfabeto latino

50% RR - Resistência residual de 50%

A - Área

A - Factor pré-exponencial

ANSI - *American National Standards Institute*

ASTM - *The American Society for Testing Materials*

AWI - Acordo técnico internacional

B - Largura do provete

BE - Electrões rectrodifundidos

BSI - *British Standard Institution*

C - Parâmetro necessário para o cálculo da resistência à tracção

C944 - Chimassorb 944

CAS - *Chemical Abstracts Service*

CE - Comissão Europeia

CEMUP - Centro de Materiais da Universidade do Porto

CEN - Comissão Europeia de Normalização

CITEVE - Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal

CV - Coeficiente de variação

CWA - *CEN workshop agreement*

D<sub>CEDÊNCIA</sub> - Deformação na cedência

DEEC - Departamento de Engenharia Electrónica e dos Computadores

DF - Direcção de fabrico

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

D<sub>ROTURA</sub> - Deformação na rotura

DSC - Calorimetria diferencial de varrimento

E - Extensão

e - Base dos logaritmos naturais

$E_0$  - Energia do feixe de electrões

$E_a$  - Energia de activação

$E_{Fmax}$  - Extensão na força máxima

ELSD - *Evaporative light scattering detection*

EN - Norma Europeia

ENV - Norma Europeia a nível experimental

ESC - Fissuração por tensão ambiental

$F_E$  - Força para uma dada extensão

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

$F_{max}$  - Força máxima

FTIR - Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

$H$  - Perda de carga hidráulica

HALS - *Hindered amine light stabilisers*

HPLC - Cromatografia líquida de alta eficiência

HPLC-UV - Cromatografia líquida de alta eficiência com detecção ultravioleta

HP-OIT - Tempo de indução da oxidação a pressão elevada

ICEG - Conferência Internacional de Geotecnia Ambiental

ICSMGE - Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

IGS - Sociedade Internacional de Geossintéticos

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Industrial

IPQ - Instituto Português da Qualidade

ISO - Organização Internacional de Normalização

ISSMGE - Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

$J_{SEC}$  - Rigidez secante

$J_{SEC} 2\%$  - Rigidez secante para uma extensão de 2%

$J_{SEC} 5\%$  - Rigidez secante para uma extensão de 5%

$J_{SEC} 10\%$  - Rigidez secante para uma extensão de 10%

$J_{SEC} 20\%$  - Rigidez secante para uma extensão de 20%

$K$  - Constante de velocidade

$K_N$  - Coeficiente de permeabilidade normal ao plano

$L$  - Distância entre dois pontos de referência

$L_0$  - Distância inicial de referência

$L_{Fmax}$  - Distância entre os pontos de referência no momento em que foi atingida a força máxima

LGS - Laboratório de Geossintéticos

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

$m$  - Massa

$m_{105\text{ }^{\circ}\text{C}}$  - Massa de solo após a secagem a 105 °C

$m_{500\text{ }^{\circ}\text{C}}$  - Massa de solo após a calcinação a 500 °C

ME - Módulo de deformabilidade inicial

MEV - Microscopia electrónica de varrimento

MUA - Massa por unidade de área

$n$  - Número

ND - Não detectado

$N_M$  - Número mínimo de elementos existentes num 1 metro de largura de geossintético

NP - Norma Portuguesa

$N_S$  - Número de elementos existentes num provete para o ensaio de tracção-extensão

OIT - Tempo de indução da oxidação

$O_n$  - Dimensão característica da abertura

ONS - Organismo de Normalização Sectorial

PA - Poliamida

PAS - Especificação disponível publicamente

PE - Polietileno

PEAD - Polietileno de alta densidade

PEC - Polietileno clorado

PECS - Polietileno clorossulfonado

PET - Polietileno tereftalato

PP - Polipropileno

PVC - Policloreto de vinilo

$R$  - Constante dos gases ideais

R - Raio

$r^2$  - Coeficiente de correlação linear ou exponencial

$R_{\text{RASGAMENTO}}$  - Resistência ao rasgamento

$R_{\text{RES}}$  - Resistência residual

$R_T$  - Parâmetro de correção para a temperatura da água

SE - Electrões secundários

T - Temperatura

T - Resistência à tracção

t - Tempo

$t_{0\% \text{ RR}}$  - Tempo necessário para o geossintético atingir uma resistência nula

$t_{50\% \text{ RR}}$  - Tempo necessário para o geossintético atingir uma resistência residual de 50%

T622 - Tinuvin 622

T783 - Tinuvin 783

$T_{\text{AMBI}}$  - Temperatura ambiente

TC - Comissão técnica

$T_{\text{CEDÊNCIA}}$  - Tensão na cedência

$T_{\text{EXP}}$  - Resistência à tracção dos provetes expostos (aos agentes de degradação)

$t_M$  - Tempo morto

$t_R$  - Tempo de retenção

TR - Relatório técnico

$T_{\text{REF}}$  - Resistência à tracção dos provetes de referência

$T_{\text{ROTURA}}$  - Tensão na rotura

TS - Especificação técnica

$\mu_A$  - Massa por unidade de área

UV - Ultravioleta

UV-VIS - Ultravioleta-vísivel

V - Volume

$v_{20}$  - Velocidade de escoamento à temperatura de 20 °C

$v_{20 \text{ H14}}$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 14 mm

$v_{20 \text{ H28}}$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 28 mm

$v_{20} H42$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 42 mm

$v_{20} H50$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 50 mm

$v_{20} H56$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 56 mm

$v_{20} H70$  - Velocidade de escoamento, a 20 °C, para uma perda de carga hidráulica de 70 mm

$V_{CM}$  - Valor obtido a partir da curva média

$V_M$  - Valor médio (obtido a partir da média dos resultados individuais)

W - Robustez

WD - Distância de trabalho da lente à amostra

WG - Grupo de trabalho

$W_{EXP}$  - Robustez dos provetes expostos (aos agentes de degradação)

$W_{REF}$  - Robustez dos provetes de referência

$W_{RES}$  - Robustez residual

[C944] - Concentração de Chimassorb 944

$[C944]_0$  - Concentração inicial de Chimassorb 944

### Alfabeto grego

$\Delta$  - Variação; diferença

$\Psi$  - Permissividade

$\Psi H50$  - Permissividade para uma perda de carga hidráulica de 50 mm





# Considerações iniciais

A garantia de durabilidade é um requisito fundamental para a aplicação dos geossintéticos nas mais diversas obras de Engenharia Civil. Assim, é importante avaliar a resistência dos materiais aos vários agentes de degradação. Apesar da relevância do tema, os estudos existentes sobre a durabilidade dos geossintéticos são, ainda hoje, relativamente escassos. No entanto, o número de estudos nesta área tem vindo a aumentar significativamente nos últimos anos.

Neste trabalho, é avaliada a resistência dos geossintéticos (geotêxteis, georredes e geomembranas) a vários agentes de degradação físicos e químicos, tais como: ácidos, bases, temperaturas elevadas, oxigénio, radiação ultravioleta e outros agentes climáticos e agentes do solo. Desta forma, este trabalho pretende contribuir para um maior conhecimento do efeito destes agentes na durabilidade dos geossintéticos (identificando os principais factores responsáveis pela degradação prematura dos materiais). Com este trabalho, pretende-se também avaliar a influência de alguns aditivos químicos (tais como, o Chimassorb 944 ou o negro de carbono) na durabilidade dos geossintéticos.

O presente trabalho está dividido em três partes. Na primeira parte, que inclui três capítulos (do 1 ao 3), faz-se um enquadramento teórico do tema. A segunda parte, com oito capítulos (do 4 ao 11), refere-se ao estudo da resistência de geotêxteis de polipropileno a diversos agentes de degradação físicos e/ou químicos. Por fim, a terceira parte (com dois capítulos, 12 e 13) inclui um estudo sobre a resistência de georredes e de geomembranas, ambas de polietileno de alta densidade, aos vários agentes de degradação. Em seguida, procede-se a uma breve descrição do conteúdo de cada um dos capítulos deste trabalho.

No Capítulo 1, procede-se à apresentação de algumas noções básicas sobre os geossintéticos: breve história, classificação, funções, matérias-primas, processos de fabrico e principais aplicações.

No Capítulo 2, são indicadas as principais normas existentes na área dos geossintéticos. Procede-se, também, à descrição das principais propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais. Por fim, são identificados os agentes de degradação dos geossintéticos.

O Capítulo 3 é dedicado à durabilidade dos geossintéticos; são descritos os principais mecanismos de degradação dos materiais, apresentados os principais aditivos químicos (e modo de funcionamento) que podem ser utilizados para proteger os geossintéticos da degradação e referidos os métodos mais usados para avaliar a resistência dos geossintéticos aos vários agentes de degradação. São, também, indicados os principais estudos existentes na literatura sobre a durabilidade dos geossintéticos. Por fim, procede-se a uma breve descrição dos fundamentos teóricos de algumas técnicas analíticas que foram usadas, durante a execução experimental, para avaliar a degradação sofrida pelos materiais nos vários ensaios de durabilidade.

No Capítulo 4, descrevem-se as metodologias utilizadas para avaliar o efeito dos diversos agentes de degradação na durabilidade dos geotêxteis. Na parte final deste capítulo, é apresentado um método para determinar o aditivo Chimassorb 944 em geotêxteis de polipropileno por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção espectrofotométrica.

As principais características dos geotêxteis estudados neste trabalho são indicadas no Capítulo 5. Os princípios gerais usados na amostragem e na preparação dos provetes para os diferentes ensaios de caracterização e de durabilidade podem, também, ser encontrados neste capítulo.

No Capítulo 6, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis à imersão em líquidos (entre os quais, soluções ácidas e alcalinas, água e um lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos).

A resistência dos geotêxteis à termo-oxidação (através do método do forno) é avaliada no Capítulo 7. A influência de alguns agentes (soluções ácidas e alcalinas e cátions metálicos) na resistência dos materiais à termo-oxidação é, também, discutida neste capítulo.

No Capítulo 8, é apresentado um novo equipamento (um protótipo) e um novo método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. Os geotêxteis foram testados por este método e os principais resultados são discutidos neste capítulo. Por fim, os resultados obtidos pelo novo método são comparados com os resultados obtidos pelo método do forno.

A resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos foi avaliada nos Capítulos 9 e 10 (exposição em laboratório e ao ar livre, respectivamente). Os resultados obtidos sob condições de exposição reais são comparados com os resultados obtidos sob condições de exposição artificiais.

No Capítulo 11, procede-se à avaliação *in situ* da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo.

A resistência das georredes e das geomembranas a vários agentes de degradação (soluções ácidas e alcalinas, termo-oxidação e agentes climáticos, tanto reais, como simulados laboratorialmente) é avaliada nos Capítulos 12 e 13, respectivamente.

Por último, nas considerações finais, destacam-se as principais conclusões do trabalho e sugerem-se algumas propostas para a continuação da investigação.

# **PARTE I**

## **Capítulo 1**

Geossintéticos - aspectos gerais

## **Capítulo 2**

Normas e ensaios em geossintéticos.  
Propriedades dos geossintéticos

## **Capítulo 3**

Durabilidade dos geossintéticos



# CAPÍTULO 1

## Geossintéticos - aspectos gerais

### 1.1 - Introdução

De acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico (sintético ou natural) plano, usado em contacto com materiais naturais (como os solos ou as rochas) ou com qualquer outro material geotécnico, em aplicações de Engenharia Civil.

Ao longo dos últimos anos, os geossintéticos têm sido amplamente aplicados nas mais diversas obras de construção civil. As principais razões para o grande sucesso dos geossintéticos incluem vantagens técnicas (rapidez e simplicidade de aplicação; grande gama de produtos para os mais variados fins), económicas (baixo custo) e ambientais (baixo impacto ambiental). Assim, os geossintéticos são uma excelente alternativa aos materiais de construção tradicionais.

Neste capítulo, procede-se à descrição de alguns aspectos gerais sobre geossintéticos: breve história dos materiais, classificação, funções, matérias-primas, processos de fabrico e aplicações.

### 1.2 - Breve história dos geossintéticos

A primeira aplicação de materiais para o melhoramento dos solos poderá ter ocorrido há milhares de anos (provavelmente ainda no período pré-histórico). Há cerca de 4000 anos, os Babilónios usavam fibras e telas para reforçar os solos durante a construção de templos (denominados de zigurates). Os Chineses, também nos tempos ancestrais, aplicavam madeira, bambu e raízes para a estabilização e melhoramento dos solos; os Egípcios e os Romanos usaram diversos materiais para fins idênticos. Na Idade Média, foram usadas peles de animais [1].

A primeira referência da aplicação de tecidos na construção (reforço de pavimentos de estradas nos Estados Unidos) data de 1926 [2]. No entanto, os geossintéticos só começaram a ser usados de forma sistemática a meio do século XX, após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década de 40; os geotêxteis tecidos surgiram na década de 50 e os geotêxteis não-tecidos na década de 60 [1].

Na década de 70, surgiram os geotêxteis não-tecidos agulhados, o que resultou num grande aumento da utilização de geossintéticos na construção. O sucesso alcançado pelos geotêxteis não-tecidos foi essencialmente devido a vantagens técnicas (facilidade de aplicação e variedade de funções que os materiais podiam exercer) e a vantagem económicas (baixo custo). O desenvolvimento e a expansão do mercado dos geotêxteis conduziram, na década de 80, ao aparecimento de novos produtos (como por exemplo, as geogrelhas, as georredes ou os geocompósitos).

Em 1977, J.P. Giroud apresentou, em Paris, os termos geotêxteis e geomembranas na *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics* (actualmente, esta é considerada como a primeira Conferência Internacional de Geossintéticos). Em 1983, a Sociedade Internacional de Geotêxteis foi fundada em Paris.

O termo “geossintético” foi introduzido em 1983 por J.E. Fluet Jr. para designar indiferentemente todos os novos produtos com aplicações em obras de carácter geotécnico. No entanto, não foi logo aceite, tendo sido considerado inadequado durante algum tempo (dado alguns produtos não terem origem sintética). Deste modo, o termo “geossintético” foi substituído pela designação “geotêxteis, geomembranas e produtos afins”. Em 1994, a Sociedade Internacional de Geotêxteis trocou de nome para Sociedade Internacional de Geossintéticos e, desde então, o termo “geossintético” é utilizado internacionalmente para designar todos os materiais, quer fabricados com produtos sintéticos, quer fabricados com produtos naturais.

Em Portugal, os geossintéticos começaram a ser aplicados regularmente desde 1980, principalmente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, foi a partir de meados da década de 90 que ocorreu um grande impulso na aplicação e na procura de conhecimentos sobre geossintéticos [3]. Em 2002, foi criada a Comissão Portuguesa de Geossintéticos (IGS-Portugal).

A expansão dos geossintéticos foi acompanhada com bastante interesse pela comunidade científica internacional. Em 1997, teve lugar a primeira Conferência Internacional de Geossintéticos em Paris. Desde 1982, que estas conferências ocorrem periodicamente de 4 em 4 anos: Las Vegas 1982, Viena 1986, Haia 1990, Singapura 1994, Atlanta 1998, Nice 2002, Yokohama 2006. Em 2010, a Conferência Internacional de Geossintéticos terá lugar no Brasil (Guarujá). Além das conferências internacionais de geossintéticos promovidas pela IGS, existem também várias conferências e encontros regionais e nacionais sobre o tema (a maioria com o apoio da IGS).

Em 1996, foi realizada a primeira Conferência Europeia de Geossintéticos (Eurogeo) em Maastrich. A Eurogeo ocorre também de 4 em 4 anos: Bolonha 2000, Munique 2004 e Edimburgo 2008. Em 1997, ocorreu a primeira Conferência Asiática de Geossintéticos (GeoAsia) em Bangalore, seguindo-se, em Kuala Lumpur 2000, Seul 2004 e Xangai 2008. Em 2008, ocorreu, em Cancun, a primeira Conferência Pan-Americana de Geossintéticos (GeoAmericas). A primeira Conferência Africana de Geossintéticos (GeoAfrica) teve lugar em 2009, na África do Sul (Cidade do Cabo).

Actualmente, algumas conferências promovidas por outras sociedades internacionais, tais como a Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ISSMGE), também incluem sessões sobre geossintéticos. Como exemplos, podem ser indicadas a Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ICSMGE) ou a Conferência Internacional de Geotecnia Ambiental (ICEG), ambas organizadas pela ISSMGE.

Em Portugal, o 1.º Seminário Português sobre Geossintéticos ocorreu no Porto em 2005; a 2.ª edição do seminário ocorreu em Lisboa em 2007. O 3.º Seminário Português sobre Geossintéticos teve lugar em Coimbra, em Novembro de 2009.

Para além das várias conferências existentes sobre geossintéticos, são ainda editadas duas revistas internacionais exclusivamente sobre os materiais: a *Geotextiles and Geomembranes* (desde 1987) e a *Geosynthetics International* (desde 1994).

### 1.3 - Tipos de geossintéticos

Os geossintéticos podem ser classificados de acordo com as diferenças estruturais existentes entre os diferentes materiais. De um modo simples, os geossintéticos podem ser divididos em geotêxteis, geomembranas e produtos relacionados (Figura 1.1). Os produtos relacionados incluem as georredes, as geogrelhas, os geocompósitos e todos os “geo-outros”. Na Figura 1.2 apresentam-se exemplos de alguns tipos de geossintéticos.

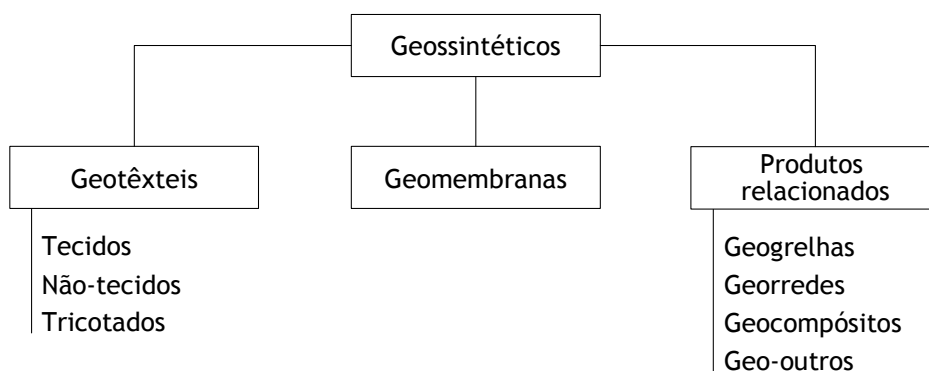


Figura 1.1 - Classificação dos geossintéticos.

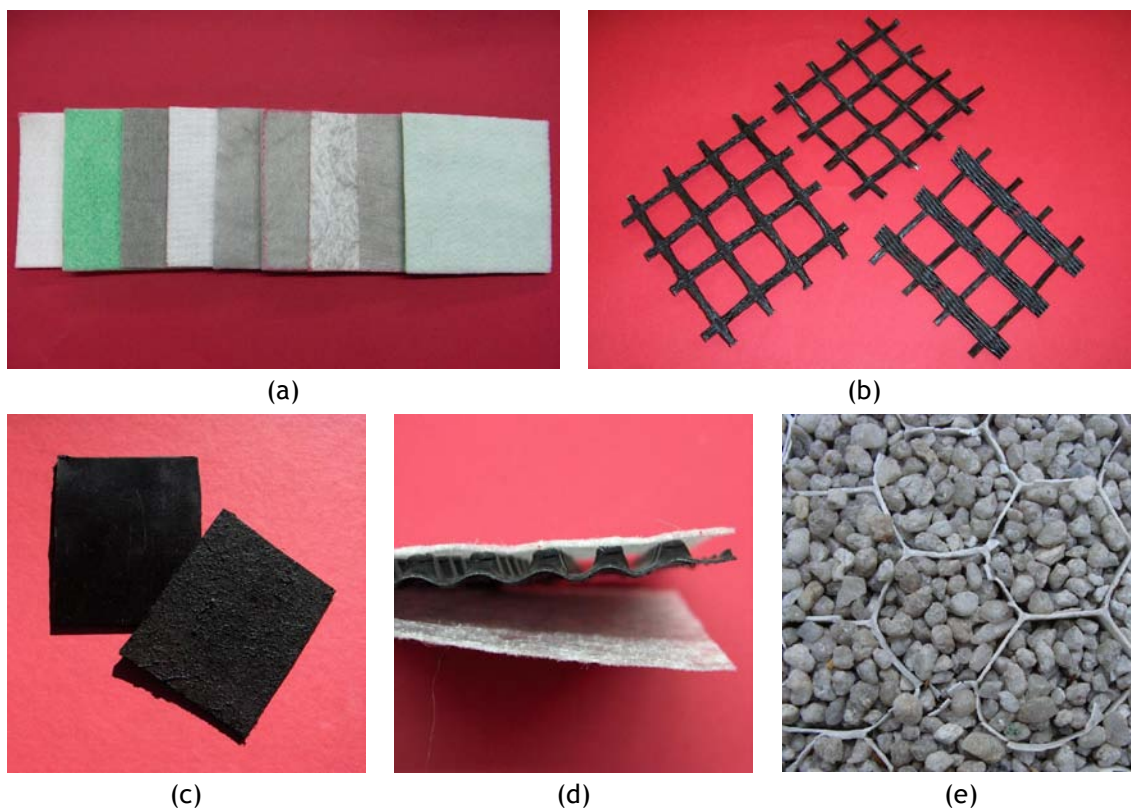


Figura 1.2 - Alguns exemplos de geossintéticos: (a) geotêxteis; (b) geogrelhas; (c) geomembranas; (d) geocompósito de drenagem; (e) geocélulas.

Em seguida, procede-se a uma breve descrição de alguns tipos de geossintéticos.

**Geotêxteis:** os geotêxteis são materiais poliméricos (normalmente sintéticos) planos e permeáveis, constituindo um dos dois grandes grupos de geossintéticos. De acordo com o processo de fabrico, os geotêxteis podem ser divididos em tecidos, não-tecidos ou tricotados; podem ser usados em imensas aplicações, mas desempenham sempre, pelo menos, uma das seguintes funções: protecção, reforço, separação, filtragem ou drenagem.

**Geomembranas:** as geomembranas são materiais poliméricos planos relativamente impermeáveis e constituem o outro grande grupo de geossintéticos; estes materiais podem ter uma superfície lisa ou rugosa (texturada). A principal função das geomembranas é a contenção de líquidos ou de gases. As geomembranas podem ser usadas em muitas aplicações (como por exemplo, em obras de engenharia ambiental, geotécnica, hidráulica ou de transportes).

**Geogrelhas:** as geogrelhas são materiais poliméricos planos com uma estrutura aberta de elementos ligados e cruzados entre si (as aberturas das geogrelhas são normalmente maiores que os elementos sólidos que as constituem). As geogrelhas podem ser aplicadas em várias áreas, mas desempenham quase sempre funções de reforço.

**Georredes:** as georredes são materiais poliméricos planos com uma malha densa e regular (tal como as geogrelhas, possuem uma estrutura aberta). A separação entre as georredes e as geogrelhas não tem a ver com a estrutura, mas sim com a função que os materiais desempenham. As geogrelhas são normalmente usadas para funções de drenagem de líquidos ou de gases.

**Geocompósitos:** os geocompósitos são formados pela associação de diferentes materiais, em que, pelo menos, um deles é um geossintético; os geocompósitos mais comuns incluem os geocompósitos bentoníticos, geocompósitos de drenagem e geocompósitos de reforço. Os geocompósitos podem ser formados a partir da combinação de inúmeros materiais, podendo, por isso, ser usados numa grande gama de aplicações (dependendo da estrutura dos materiais, os geocompósitos podem desempenhar qualquer uma das funções normalmente atribuídas aos geossintéticos).

**“Geo-outros”:** a inovação ocorrida na indústria dos geossintéticos durante os últimos anos originou o aparecimento de novos produtos com características muito distintas. O termo “geo-outros” é aqui usado para agrupar todos os geossintéticos que não pertencem a nenhuma das categorias anteriores (exemplos de “geo-outros” incluem as geocélulas, os geotubos, as geomantas, entre muitos outros); as funções desempenhadas pelos “geo-outros” dependem das características dos materiais.

#### 1.4 - Funções dos geossintéticos [1, 4]

A designação “geossintético” engloba uma grande variedade de materiais, muito diferentes uns dos outros e com inúmeras aplicações nos diversos domínios da Engenharia Civil. Numa dada aplicação, os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções em simultâneo. Assim, e para o correcto dimensionamento destes materiais, é necessário definir e hierarquizar essas funções.



A norma EN ISO 10318:2005 descreve as sete funções que os geossintéticos podem desempenhar: (1) drenagem, (2) filtragem, (3) protecção, (4) reforço, (5) separação, (6) controlo de erosão superficial e (7) barreira de fluidos (Figura 1.3).

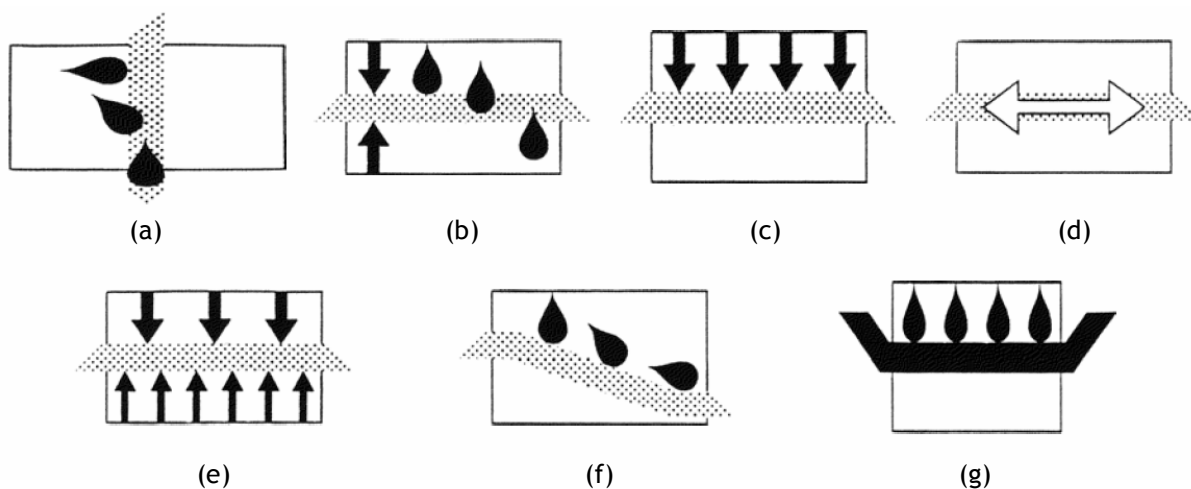


Figura 1.3 - Principais funções desempenhadas pelos geossintéticos (EN ISO 10318:2005):  
 (a) drenagem; (b) filtragem; (c) protecção; (d) reforço; (e) separação;  
 (f) controlo de erosão superficial; (g) barreira de fluidos.

As funções de drenagem, filtragem, protecção, reforço, separação e controlo de erosão superficial podem ser adequadamente desempenhadas por uma grande variedade de geossintéticos. A função de barreira de fluidos apenas pode ser exercida por um grupo muito restrito de geossintéticos, onde se incluem as geomembranas e alguns geocompósitos.

Em seguida, procede-se a uma breve descrição das funções dos geossintéticos.

**Drenagem:** a função de drenagem consiste na recolha e no transporte de fluidos (líquidos ou gases) ao longo do plano de um geossintético. Assim, os geossintéticos devem permitir a livre circulação de fluidos no seu plano. As aberturas dos geossintéticos devem ter dimensões que impeçam a passagem de partículas sólidas para o interior dos drenos (e, ao mesmo tempo, não devem ficar bloqueadas ou colmatadas com essas mesmas partículas).

**Filtragem:** esta função envolve o movimento de fluidos através dos geossintéticos (fluxo normal ao plano dos materiais) e retenção simultânea do solo no sentido do fluxo. Os geossintéticos devem ter uma estrutura suficientemente aberta para permitir a passagem dos fluidos mas, ao mesmo tempo, suficientemente fechada para impedir a passagem dos solos. Além disso, os poros dos geossintéticos não devem colmatar durante o tempo de vida da estrutura onde os materiais foram instalados. Os geossintéticos devem, também, possuir uma boa flexibilidade para permitir um bom ajuste com o solo envolvente (impedindo, assim, a migração de partículas para vazios que seriam criados entre o geossintético e o solo).

**Protecção:** a função de protecção consiste em evitar ou limitar a ocorrência de danificação de um determinado elemento ou material através do recurso a um geossintético; os geossintéticos exercem

uma função de protecção quando são colocados na interface entre dois materiais para absorver ou distribuir as tensões ou as deformações que poderiam ser transmitidas ao material a ser protegido.

**Reforço:** os geossintéticos exercem a função de reforço quando são instalados para melhorar as propriedades mecânicas de um solo ou de outro material de construção. Os geossintéticos exercem função de reforço essencialmente em duas situações: (1) quando são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra a diferença de pressão entre essas camadas, conduzindo ao reforço global; (2) quando são colocados no interior de maciços para suportar tensões de tracção, aumentando a capacidade global da estrutura para resistir a esforços deste tipo. Esta função requer que os geossintéticos possuam propriedades mecânicas adequadas (tanto no momento da instalação, como ao longo do tempo).

**Separação:** a função de separação consiste em evitar a mistura de dois materiais adjacentes (com características diferentes) através da colocação de um geossintético entre eles. A barreira sintética é introduzida para assegurar a integridade e o correcto funcionamento dos dois materiais, evitando que estes se misturem ou interpenetrem.

**Controlo de erosão superficial:** esta função consiste na utilização de um geossintético para evitar ou limitar os movimentos de solo ou de outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude. Esta função pode ser desempenhada de forma provisória (usando geossintéticos biodegradáveis até à consolidação da estrutura, por exemplo, pelo crescimento da vegetação) ou de forma permanente (por exemplo, para prevenir a erosão costeira).

**Barreira de fluidos:** a função de barreira consiste em usar um geossintético para evitar a migração de fluidos (líquidos ou gases). Para exercer esta função, os geossintéticos têm de ser impermeáveis e contínuos (uma ligação correcta entre as diferentes porções dos materiais é muito importante). Os geossintéticos devem ser suficientemente resistentes aos ataques químicos (causados pelos fluidos) e não devem sofrer danos durante as operações de transporte, manuseamento e instalação.

## 1.5 - Matérias-primas usadas no fabrico de geossintéticos

### 1.5.1 - Considerações iniciais

As matérias-primas usadas para o fabrico de geossintéticos podem ser naturais (lã, algodão, seda, entre outros) ou sintéticas. No entanto, as matérias-primas naturais raramente são usadas, devido a serem biodegradáveis e a não originarem materiais com propriedades mecânicas adequadas para um grande número de aplicações. Assim, os geossintéticos são maioritariamente produzidos a partir de matérias-primas de origem sintética (normalmente, polímeros orgânicos sintéticos).

A composição dos geossintéticos inclui normalmente o polímero de base (por exemplo, poliolefinas ou poliésteres) e os aditivos químicos (por exemplo, estabilizantes UV ou antioxidantes); os aditivos são normalmente adicionados para melhorar as propriedades e/ou o desempenho dos materiais. Em seguida, procede-se a uma descrição dos principais polímeros e tipos de aditivos químicos usados no fabrico de geossintéticos.

## 1.5.2 - Polímeros

### 1.5.2.1 - Aspectos gerais [1, 5, 6]

Os polímeros (do grego, *muitas unidades*) são macromoléculas formadas pela repetição de pequenas unidades (monómeros), iguais ou quimicamente idênticas. Os polímeros podem ter origem sintética (preparados pela indústria química) ou podem ser naturais (produzidos pelos organismos vivos).

O peso molecular de um polímero (produto do peso molecular dos monómeros pelo número de vezes que os monómeros se repetem na cadeia polimérica) tem uma grande influência nas propriedades (e no comportamento) dos materiais poliméricos: o aumento do peso molecular provoca o aumento da resistência à tracção, da extensão, da rigidez, da resistência ao impacto, da resistência ao calor e da resistência ao aparecimento de fendas; além disso, origina uma diminuição da fluência, dificulta a manipulação dos materiais e pode ter efeitos na durabilidade dos materiais.

A cristalinidade (medida da organização tridimensional das cadeias poliméricas) é outra propriedade determinante para as propriedades dos polímeros; os polímeros podem ser divididos em amorfos ou semi-cristalinos (não existem polímeros puramente cristalinos). O aumento da cristalinidade de um material polimérico resulta no aumento da resistência à tracção, da rigidez, da resistência ao calor e da resistência química; além disso, origina uma diminuição da permeabilidade, da deformação, da flexibilidade e da transparência. Os polímeros semi-cristalinos são normalmente mais densos que os polímeros amorfos (devido a possuírem uma estrutura molecular mais arrumada). A percentagem de cristalinidade dos polímeros usados para o fabrico de geossintéticos varia normalmente entre os 30% (para o policloreto de vinilo) e os 75% (para o polietileno de alta densidade).

Os termos “polímero” e “plástico” são muitas vezes usados como sinónimos, mas na realidade existe uma distinção em ambos: os polímeros são os materiais puros obtidos no processo de polimerização e raramente são usados sem a posterior adição de aditivos [7]; os plásticos, para além do polímero de base, possuem um ou mais aditivos na sua composição.

Os plásticos podem ser divididos em termoplásticos ou termorrígidos. Os termoplásticos amolecem pela acção do calor e endurecem pela acção do frio; os termorrígidos não amolecem pela acção do calor. A maioria dos geossintéticos é produzida a partir de termoplásticos (por exemplo, poliésteres, poliolefinas, poliamidas ou policloreto de vinilo).

### 1.5.2.2 - Reacções de polimerização [8-10]

Os polímeros podem ser formados de duas formas: por polimerização de reacção em cadeia ou por polimerização de crescimento gradual.

A polimerização de reacção em cadeia (também designada por polimerização de adição) envolve a formação de um polímero pela combinação de muitas unidades de um monómero, sem a ocorrência de perda de átomos. Os polímeros de adição mais simples são os homopolímeros (formados a partir do mesmo tipo de monómero); os polímeros formados por diferentes monómeros são designados por copolímeros.

O polietileno (PE) é um exemplo de um homopolímero obtido através da combinação de um número muito elevado de moléculas de etileno ( $\text{CH}_2\text{CH}_2$ ), na presença de um catalisador. A Figura 1.4 ilustra o processo de polimerização do etileno (polimerização de reacção em cadeia).

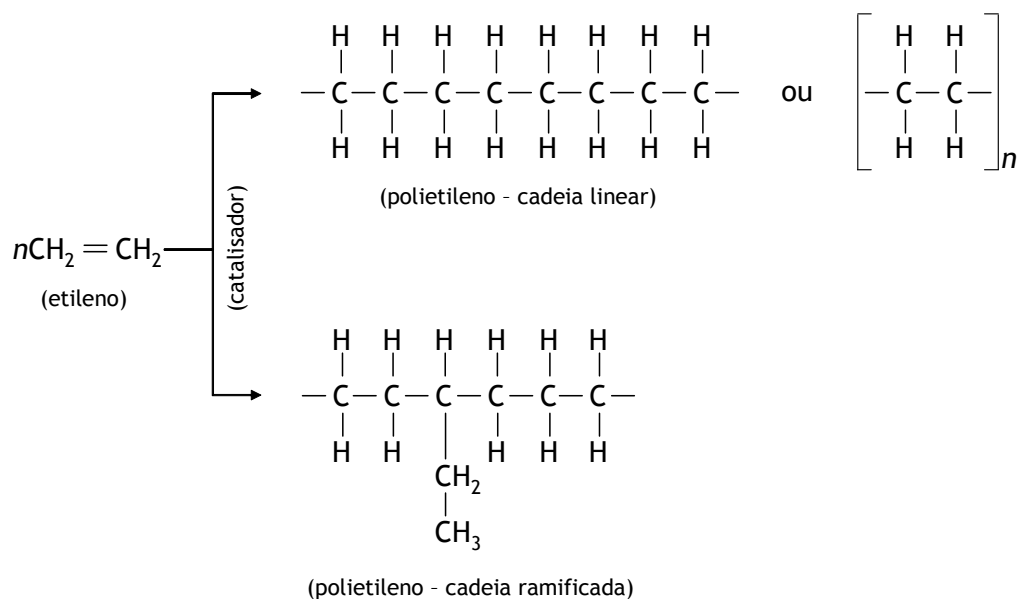


Figura 1.4 - Reacção de polimerização do etileno.

A cadeia polimérica do PE pode ser linear ou possuir ramificações, originando várias formas de PE: o PE de baixa densidade (com muitas ramificações na cadeia), o PE de média densidade e o PE de alta densidade (PEAD) (cadeias quase todas lineares; mais denso devido a um maior empacotamento das cadeias); o PEAD é mais duro e mais forte, mas menos transparente que o PE de baixa densidade.

A polimerização por reacção em cadeia do propileno origina o polipropileno (PP) (um dos polímeros mais usados no fabrico de geossintéticos) (Figura 1.5).

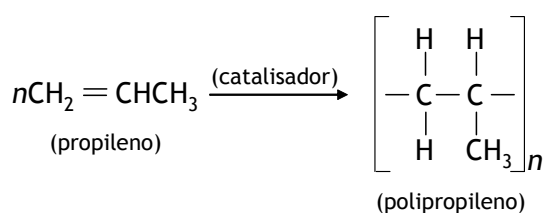


Figura 1.5 - Reacção de polimerização do propileno.

Na polimerização de crescimento gradual (ou polimerização de condensação) ocorre a perda de uma pequena molécula (por exemplo, uma molécula de água) sempre que um monómero se liga à cadeia polimérica. A formação do nylon 66 (uma poliamida) (Figura 1.6) é um exemplo de uma reacção de polimerização de crescimento gradual (resulta da condensação da hexametenodiamina com o ácido adípico; o nylon 66 é um copolímero).

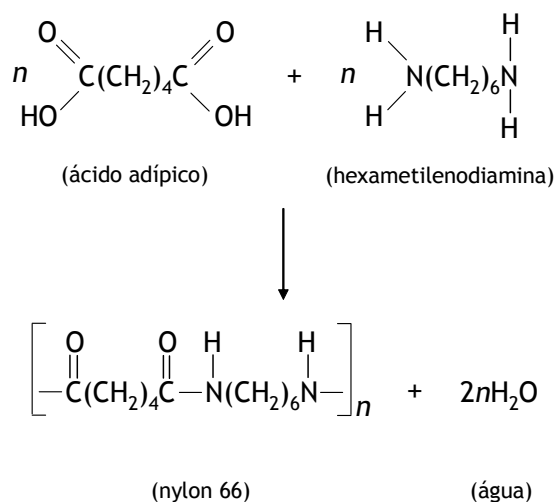


Figura 1.6 - Reacção de formação do nylon 66 (poliamida).

Os poliésteres são formados por polimerização de crescimento gradual a partir da condensação de diácidos com diálcoois. O processo de formação do polietileno tereftalato (PET) (um polímero muito usado no fabrico de geossintéticos) encontra-se ilustrado na Figura 1.7 (o PET é formado a partir do ácido tereftálico e do etilenoglicol; o PET é um copolímero).

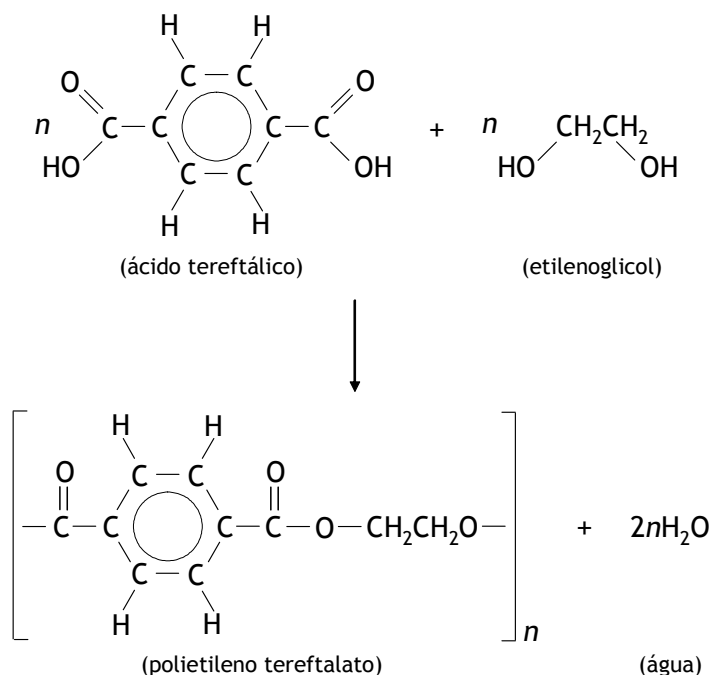


Figura 1.7 - Reacção de formação do polietileno tereftalato (poliéster).

### 1.5.2.3 - Polímeros usados no fabrico de geossintéticos [5, 7, 11, 12]

Os geotêxteis são materiais termoplásticos produzidos a partir de poliolefinas (PE e PP), poliésteres (normalmente o PET) e poliamidas (PA). A gama de polímeros usada na produção de geomembranas é bastante maior que a dos geotêxteis: podem ser usados polímeros termoplásticos, termorrígidos ou combinações de ambos. Os polímeros utilizados em geomembranas incluem o PE, o policloreto de vinilo (PVC), polietilenos clorados (PEC), polietilenos clorossulfonados (PECS), entre outros.

Em seguida, procede-se a uma breve descrição das características de alguns polímeros usados para o fabrico de geossintéticos.

### **Polietileno**

O PE é um dos polímeros orgânicos mais simples; é um termoplástico semi-cristalino com um ponto de fusão de cerca de 135 °C e uma densidade entre os 0,910 e os 0,960. O PE utilizado no fabrico de geossintéticos pode ser de baixa densidade (0,910 a 0,925), de média densidade (0,926 a 0,940) ou de alta densidade (0,941 a 0,960). O PE de baixa densidade é mais flexível e mais fácil de processar; o PE de alta densidade é mais rígido e possui maior resistência química. As propriedades do PE são altamente influenciadas pelo grau de cristalinidade do polímero. O PE não é muito usado no fabrico de geotêxteis (apenas para cerca de 1% a 2% dos materiais), mas é muito utilizado para o fabrico de geomembranas e de outros geossintéticos.

### **Polipropileno**

O PP é um termoplástico semi-cristalino com um ponto de fusão de aproximadamente 165 °C e uma densidade de aproximadamente 0,90 (o PP é um dos polímeros mais leves; dado que a densidade do PP é inferior à densidade da água, os materiais de PP flutuam). O PP apresenta uma boa resistência a ácidos, a bases e à maioria dos solventes (alguns líquidos, como solventes clorados, gasolina ou o xileno podem afectar os materiais). O PP é menos resistente à oxidação a temperaturas elevadas do que o PE; a menor resistência à oxidação do PP é devido à existência de carbonos terciários na sua cadeia polimérica (mais susceptíveis de sofrerem um ataque por parte de radicais livres, com perda de átomos de hidrogénio). Assim, são normalmente adicionados antioxidantes ao PP para prevenir a oxidação durante o processo de fabrico e para melhorar a durabilidade dos materiais a longo prazo. O PP é o polímero mais usado no fabrico de geotêxteis (85% de todos os geotêxteis segundo Koerner [4]; 65% de todos os geotêxteis de acordo com Ingold [5]).

### **Polietileno tereftalato**

O PET é um termoplástico semi-cristalino com um ponto de fusão (cerca de 260 °C) muito maior que o ponto de fusão das poliolefinas PE e PP e com uma densidade de cerca de 1,38 (mais denso do que a água, logo os materiais de PET não flutuam). O PET possui boas propriedades mecânicas e boa resistência química à maioria dos ácidos e a vários solventes. Na presença de água, o grupo éster do PET pode sofrer, muito lentamente, hidrólise (a hidrólise é acelerada em ambientes alcalinos muito fortes). Tal como para o PE e para o PP, também são normalmente adicionados aditivos químicos ao PET para aumentar a sua durabilidade a longo prazo. O PET é o segundo polímero mais usado para o fabrico de geotêxteis (12% de todos os geotêxteis segundo Koerner [4]; 30% de todos os geotêxteis de acordo com Ingold [5]); o PET é também vulgarmente usado para o fabrico de geogrelhas.

### **Poliamidas**

As PA (também conhecidas por nylon) são termoplásticos semi-cristalinos; existem imensos tipos de nylons, sendo os mais comuns os nylons 6 e 66 (o tipo de nylon é indicativo do número de átomos de carbono dos monómeros - de um ou mais tipos - que formam o polímero: o nylon 66 é formado por 2 monómeros diferentes, cada um com 6 átomos de carbono; o nylon 6 é formado apenas por um tipo

de monómero com 6 átomos de carbono). Os nylons 6 e 66 possuem densidades idênticas (cerca de 1,10), mas diferentes pontos de ebulição (255 e 265 °C, respectivamente). Os nylons possuem boa resistência às temperaturas elevadas, flexibilidade, resistência à abrasão, baixa permeabilidade a gases e líquidos e boa resistência química. As principais limitações dos nylons incluem a tendência para absorver água (causando alterações na sua estrutura e nas suas propriedades mecânicas) e uma resistência limitada a ácidos e aos agentes climáticos. Os nylons são raramente usados no fabrico de geotêxteis (segundo Koerner [4] e Ingold [5], apenas cerca de 1% dos geotêxteis são nylons).

### **Policloreto de vinilo**

O PVC é um plástico amorfo polimerizado a partir de monómeros de cloreto de vinilo (polimerização de reacção em cadeia). O PVC existe em duas formas: plastificada ou não plastificada (o polímero é flexível na forma plastificada e rígido na forma não plastificada); a forma plastificada é conseguida através da adição de aditivos (plastificantes) ao polímero. O PVC pode sofrer degradação quando exposto a temperaturas superiores a 70 °C (a degradação é normalmente indicada pela alteração da cor do polímero: com o aumento da degradação, a cor do polímero muda de amarelo para castanho e, finalmente, para preto). O PVC possui normalmente estabilizadores térmicos (protecção contra o efeito da temperatura) e estabilizadores UV (protecção contra a radiação UV). O PVC é usado para o fabrico de geomembranas (e eventualmente de outros geossintéticos; não é utilizado para o fabrico de geotêxteis).

O Quadro 1.1 compara algumas propriedades dos polímeros normalmente utilizados para o fabrico de geossintéticos.

Quadro 1.1 - Comparação de algumas propriedades dos polímeros normalmente usados para o fabrico de geossintéticos (adaptado de [1]).

| Propriedades          |                |                  | Polímeros |         |         |         |
|-----------------------|----------------|------------------|-----------|---------|---------|---------|
|                       |                |                  | PE        | PP      | PET     | PA      |
| Resistência à tracção |                |                  | Baixo     | Baixo   | Elevado | Médio   |
| Rigidez               |                |                  | Baixo     | Baixo   | Elevado | Médio   |
| Extensão na rotura    |                |                  | Elevado   | Elevado | Médio   | Médio   |
| Fluência              |                |                  | Elevado   | Elevado | Baixo   | Médio   |
| Peso volúmico         |                |                  | Baixo     | Baixo   | Elevado | Médio   |
| Custo                 |                |                  | Baixo     | Baixo   | Elevado | Médio   |
| Resistência a         | Radiação UV    | Não estabilizado | Médio     | Baixo   | Elevado | Médio   |
|                       |                | Estabilizado     | Elevado   | Elevado | Elevado | Médio   |
|                       | Bases          |                  | Elevado   | Elevado | Baixo   | Elevado |
|                       | Microrganismos |                  | Médio     | Elevado | Médio   | Médio   |
|                       | Óleos          |                  | Baixo     | Baixo   | Médio   | Médio   |
|                       | Detergentes    |                  | Elevado   | Elevado | Elevado | Elevado |

### 1.5.3 - Aditivos químicos [13-15]

Os aditivos plásticos constituem uma extensa gama de compostos químicos usados para melhorar as propriedades, o processamento e o desempenho dos materiais poliméricos. Em geral, os aditivos devem ser eficientes no desempenho das suas funções, devem ser estáveis, devem possuir uma boa resistência à extracção e não devem prejudicar as propriedades dos polímeros.

Os aditivos são normalmente classificados de acordo com a sua função (e não de acordo com as suas propriedades químicas). Em seguida, procede-se a uma breve descrição de alguns tipos de aditivos; alguns destes tipos de aditivos serão descritos com maior detalhe no Capítulo 3.

**Antioxidantes:** aditivos usados para proteger os polímeros da degradação oxidativa, tanto durante o processamento, como durante o tempo de serviço. A degradação oxidativa dos polímeros pode ser iniciada pela acção do calor, pela acção da radiação ultravioleta (UV), por impurezas metálicas ou por stress mecânico. Os antioxidantes são muito usados para aumentar a resistência das poliolefinas à oxidação.

**Biocidas:** aditivos que protegem os polímeros da acção das bactérias, fungos, algas ou bolores. Na ausência de biocidas, e em determinadas condições (normalmente ambientes quentes e húmidos), estes organismos podem desenvolver-se à superfície dos materiais poliméricos e provocar reacções alérgicas, odores desagradáveis e eventualmente uma falha prematura dos materiais. Os dois tipos mais comuns de biocidas são os fungicidas e os bactericidas.

**Estabilizantes UV:** aditivos usados para retardar ou suprimir as reacções químicas provocadas pela exposição à radiação UV. Na ausência destes aditivos, os materiais poliméricos usados em aplicações exteriores podem sofrer alterações indesejáveis nas suas propriedades físicas e mecânicas (redução de resistência, aparecimento de fissuras, descoloração, entre outras alterações). Os estabilizantes UV são muito utilizados para aumentar a resistência das poliolefinas à foto-degradação.

**Estabilizantes térmicos:** aditivos usados para reduzir ou evitar a degradação térmica de materiais poliméricos expostos a temperaturas elevadas (durante o processamento e durante o tempo de vida útil dos produtos finais).

**Retardantes de chama:** aditivos usados para dificultar a ignição, reduzir a formação de fumo e para diminuir a velocidade de combustão dos materiais poliméricos.

**Plastificantes:** aditivos usados para tornar os materiais poliméricos mais maleáveis, mais flexíveis e mais macios; podem também permitir o aumento da resistência ao impacto. Os plastificantes são muito utilizados para melhorar as características do PVC (aumento da flexibilidade).

**Pigmentos:** aditivos adicionados aos materiais poliméricos para lhes conferir cor. Dependendo do pigmento, podem também fornecer estabilização contra a acção de alguns agentes de degradação, como a radiação UV. O pigmento mais utilizado em geossintéticos é o negro de carbono.



## **1.6 - Processos de fabrico dos geossintéticos [1, 4, 5]**

### **1.6.1 - Considerações iniciais**

Os processos de fabrico dos geossintéticos podem ser muito variados, determinando a estrutura dos materiais e, consequentemente, as suas propriedades. De um modo geral, o processo de fabrico dos geossintéticos pode ser dividido em três passos fundamentais: (1) produção da mistura polimérica (polímero base misturado com os aditivos); (2) produção dos componentes (fibras, fios, tiras, folhas, entre outros); (3) conversão dos componentes no geossintético. De seguida, procede-se a uma breve descrição de cada um dos três passos de fabrico dos geossintéticos.

### **1.6.2 - Produção da mistura polimérica**

A produção da mistura polimérica (polímero de base mais aditivos) é o primeiro passo para o fabrico dos geossintéticos. Os polímeros de base são produzidos por indústrias químicas especializadas e são normalmente fornecidos aos fabricantes de geossintéticos sob a forma granular ou esférica (muitas vezes os polímeros fornecidos possuem alguma estabilização de base, para facilitar as operações de transformação e impedir a ocorrência de degradação durante o armazenamento ou transformação).

A mistura polimérica é obtida pela mistura do polímero de base com um ou mais aditivos (de modo a melhorar as propriedades do produto final e/ou facilitar as operações de transformação). Em alguns casos, o fabricante de geossintéticos poderá optar por adquirir a mistura polimérica já devidamente estabilizada. A transformação da mistura polimérica irá originar os componentes dos geossintéticos.

### **1.6.3 - Produção dos componentes dos geossintéticos**

Os componentes dos geossintéticos são normalmente obtidos por extrusão do polímero e podem ter formas muito variadas; as mais comuns são: (1) filamento contínuo circular, com diâmetro médio de alguns micrómetros e comprimento indefinido; (2) tira plana contínua, com alguns milímetros de largura, vários micrómetros de espessura e comprimento indefinido; (3) folha ou película, podendo ter alguns metros de largura e uma espessura a variar entre uma fracção de milímetro (película) e vários milímetros (folha). Os componentes básicos dos geossintéticos podem ainda ser sujeitos a transformações posteriores para darem origem a formas mais complexas.

No processo de extrusão ou fiação líquida, o polímero base e os aditivos químicos são introduzidos num recipiente, ficando sujeitos a temperaturas e pressões controladas. Posteriormente, a mistura líquida é expelida através de uma placa perfurada com orifícios de diâmetro conhecido - molde de extrusão (Figura 1.8); os filamentos formados são depois arrefecidos ao ar ou em água.

O processo de fabrico das tiras e das películas é semelhante. Nesses casos, a mistura polimérica é obrigada a sair através de fendas. As tiras (ou fitas) podem ser produzidas directamente ou obtidas através do corte das películas.

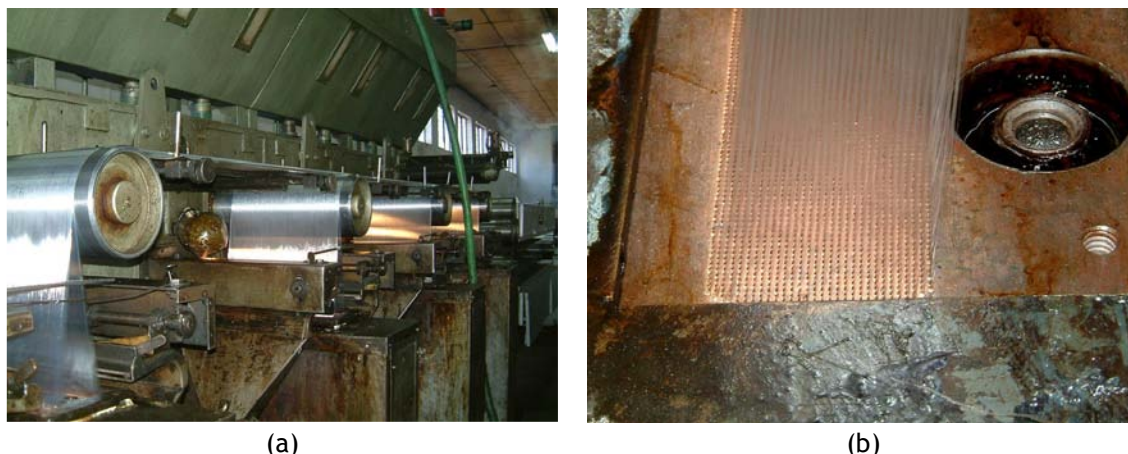


Figura 1.8 - Processo industrial de fabrico de monofilamentos de PP:  
(a) vista geral; (b) pormenor do molde de extrusão.

Em seguida, os filamentos ou as tiras são sujeitos a processos de estiramento e solidificação através de tratamentos por temperatura. O processo de estiramento (Figura 1.9) é necessário para melhorar as propriedades dos materiais (por exemplo, a resistência à tracção, a extensão na rotura, o módulo de rigidez, a fluência, entre outros). A cadeia molecular é progressivamente orientada na direcção do estiramento, originando uma estrutura final mais cristalina.



Figura 1.9 - Processo de estiramento de monofilamentos de PP:  
(a) passagem por um tanque de água quente; (b) passagem por cilindros rotativos.

Os filamentos podem ser usados sob a forma de monofilamentos ou sob a forma de multifilamentos (alinhados paralelamente ou torcidos, dando origem a fios). Os monofilamentos podem ser cortados em pequenos pedaços (alguns milímetros de comprimento), originando fibras (Figura 1.10).

A combinação dos diversos componentes (pelas diferentes técnicas) resulta nos geossintéticos. Nos pontos seguintes, procede-se a uma breve descrição das principais técnicas existentes para o fabrico de geotêxteis e de geomembranas.



Figura 1.10 - Processo de corte dos monofilamentos de PP: (a) vista geral do processo; (b) pormenor do sistema de corte e de recolha das fibras (por aspiração).

#### 1.6.4 - Produção de geotêxteis

Os geotêxteis, dependendo do processo de fabrico (e da estrutura), podem ser divididos em tecidos, não-tecidos e tricotados. A Figura 1.11 ilustra alguns geotêxteis tecidos e não-tecidos.

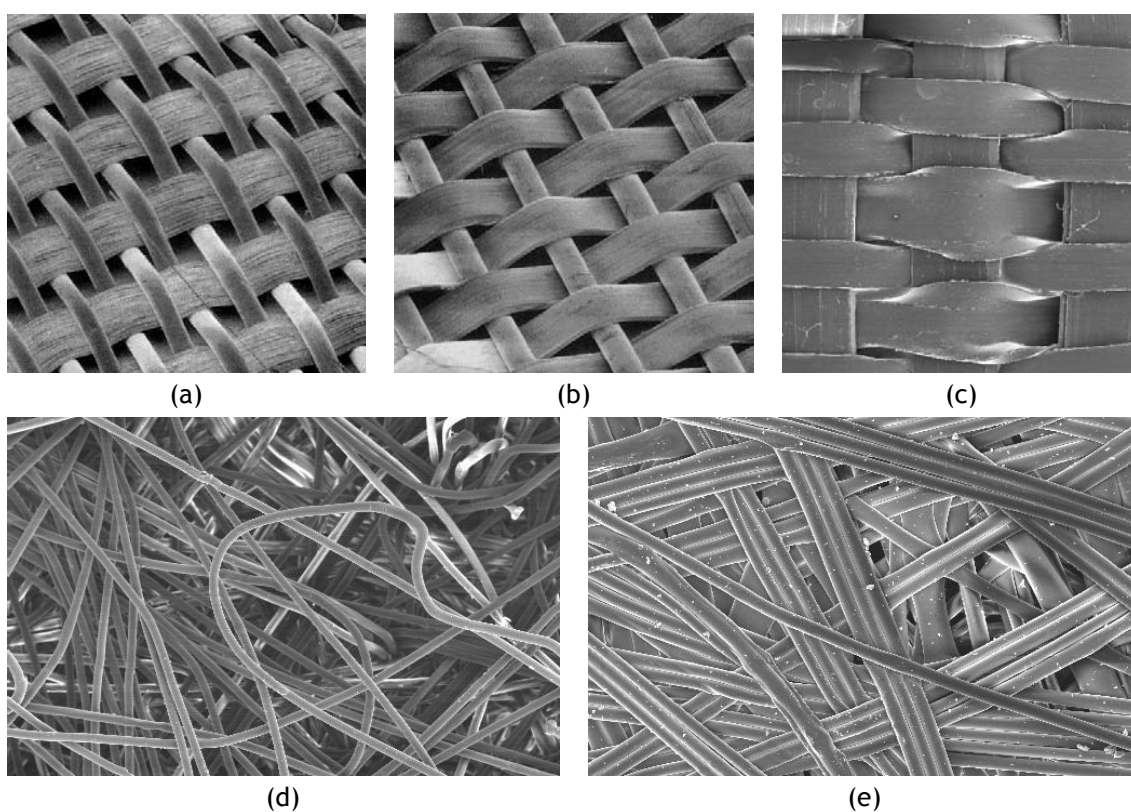


Figura 1.11 - Geotêxteis tecidos e não-tecidos: (a) tecido com monofilamento e multifilamento [5]; (b) tecido com monofilamento e tira [5]; (c) tecido com tiras; (d) não-tecido com ligação mecânica; (e) não-tecido com ligação térmica.

##### Geotêxteis tecidos

Os geotêxteis tecidos são produzidos através de processos tradicionais de tecelagem, em que dois conjuntos de componentes (normalmente perpendiculares) são entrelaçados entre si, formando uma

estrutura plana com poucos milímetros de espessura e com uma distribuição de poros relativamente regular (Figura 1.12). Os componentes básicos normalmente usados no fabrico de geotêxteis tecidos incluem monofilamentos, multifilamentos e tiras. De um modo geral, os geotêxteis tecidos possuem espessuras compreendidas entre os 0,5 e os 2 mm.

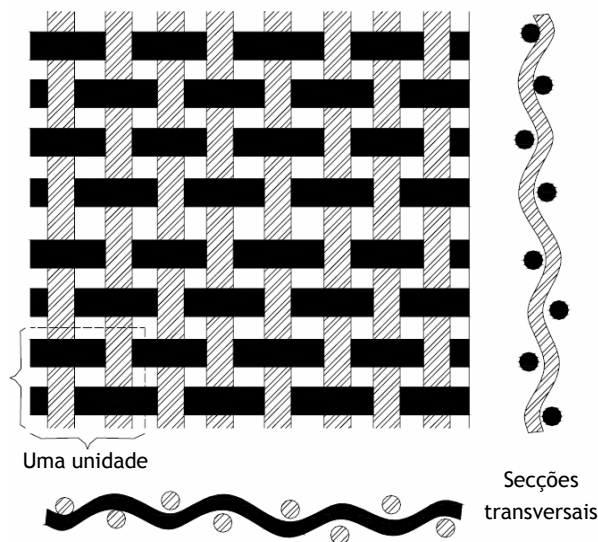


Figura 1.12 - Estrutura típica dos geotêxteis tecidos (adaptado de [16]).

### **Geotêxteis não-tecidos**

Os geotêxteis não-tecidos são produzidos dispondo os componentes (normalmente monofilamentos contínuos ou fibras) numa malha solta (mais espessa que o produto final) e efectuando a sua ligação (mecânica, térmica ou química). Os geotêxteis não-tecidos possuem uma estrutura plana com uma distribuição aleatória de poros.

A ligação mecânica (muitas vezes designada por agulhagem) é conseguida através da passagem da malha solta através de milhares de agulhas (com farpas) que se movimentam continuamente (Figura 1.13). As agulhas penetram na malha arrastando consigo alguns componentes e entrelaçando-os com outros. Os geotêxteis obtidos por este processo designam-se por não-tecidos agulhados e possuem espessuras normalmente compreendidas entre os 0,5 e os 5 mm.

A ligação térmica é conseguida através do aquecimento da malha. Para os materiais formados por componentes com a mesma composição química, a temperatura deve ser aplicada apenas em alguns pontos da malha (pontos a ligar), de modo a evitar a fusão global dos componentes (dando origem a uma folha de plástico com pouco ou nenhum valor) [17]. No caso dos componentes não possuírem a mesma composição química (diferentes polímeros com diferentes pontos de fusão), a fusão selectiva de um dos componentes (o de menor ponto de fusão) irá originar uma ligação por fusão nos pontos de contacto entre este componente e os restantes componentes. Os geotêxteis não-tecidos obtidos por este processo designam-se por termoligados (ou termossoldados) e, normalmente, possuem uma espessura compreendida entre 0,5 e 1 mm.



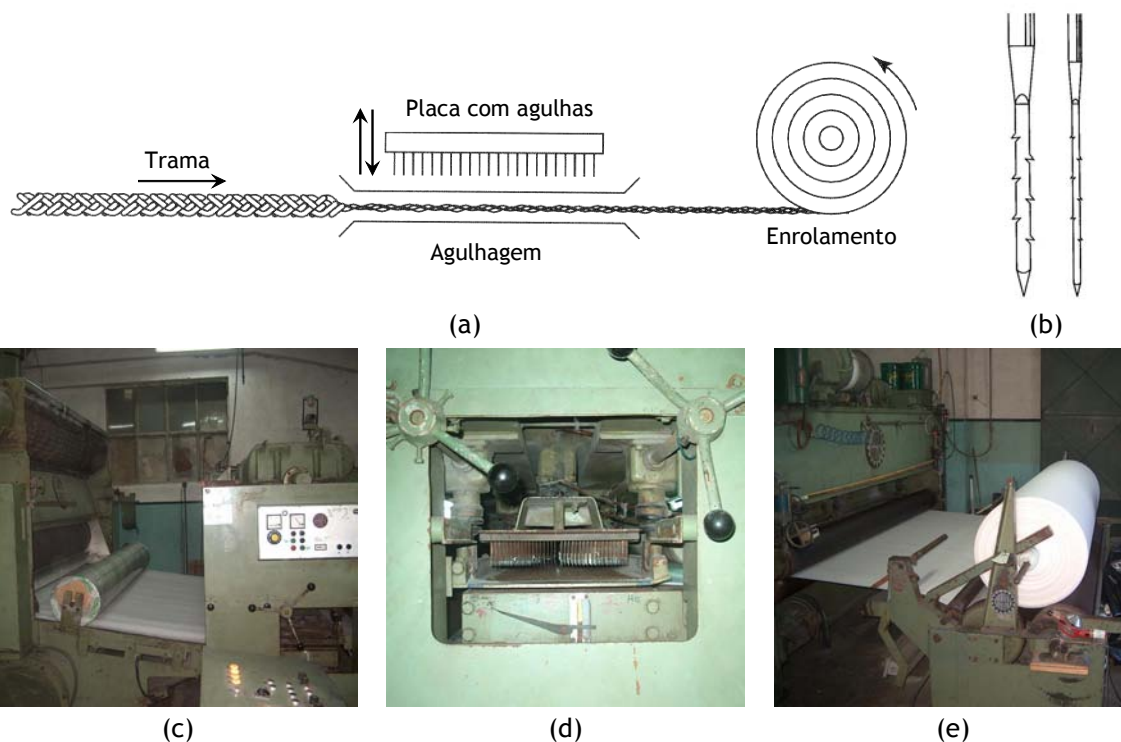


Figura 1.13 - Processo de fabrico de geotêxteis não-tecidos - ligação mecânica por agulhagem: (a) esquema geral (adaptado de [4]); (b) exemplos de agulhas [4]; (c) processo de agulhagem; (d) pormenor da placa com agulhas; (e) enrolamento do geotêxtil após o processo de agulhagem.

A ligação química é conseguida através da pulverização ou impregnação da malha com um agente de ligação químico (como a cola). Os geotêxteis obtidos por este processo designam-se por geotêxteis não-tecidos quimicamente ligados; a espessura destes materiais varia normalmente entre os 3 e os 5 mm. Em algumas situações, a ligação química é efectuada após uma ligação mecânica, de modo a melhorar as ligações entre os componentes.

### Geotêxteis tricotados

Os geotêxteis tricotados são fabricados entrelaçando fios de modo a formarem uma estrutura plana (Figura 1.14). Os geotêxteis tricotados são muito pouco utilizados devido a deformarem-se bastante por aplicação de carga [3].

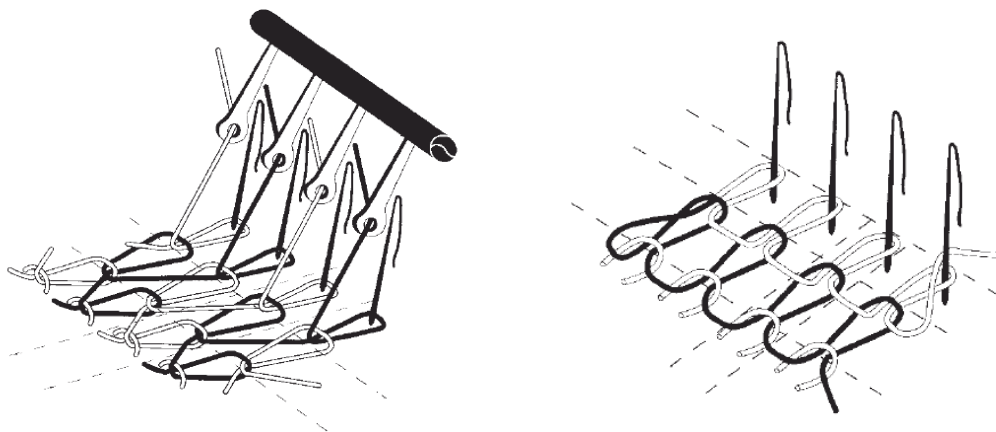


Figura 1.14 - Estruturas típicas de têxteis tricotados (adaptado de [18]).

### 1.6.5 - Produção de geomembranas

Os processos mais comuns para o fabrico das geomembranas incluem a extrusão, a calandragem e o espalhamento superficial.

O processo de extrusão é o procedimento mais simples para o fabrico de geomembranas, originando materiais com uma só camada e não reforçados; este processo permite o fabrico de geomembranas com espessuras normalmente compreendidas entre os 0,1 e os 5 mm e larguras entre 1 a 5 m. Após a extrusão, as geomembranas (ainda a quente) podem ser reforçadas pela adição de um geotêxtil; é importante notar que as geomembranas reforçadas combinam dois tipos de geossintéticos e, assim, podem ser consideradas geocompósitos.

O processo de calandragem (compressão do material entre cilindros aquecidos de rotação contrária) é o processo mais usado para o fabrico das geomembranas [5]; este processo permite o fabrico de geomembranas com multicamadas (Figura 1.15). A calandragem ocorre muitas vezes após o processo de extrusão, para uniformizar a superfície dos materiais e melhorar as suas propriedades mecânicas.

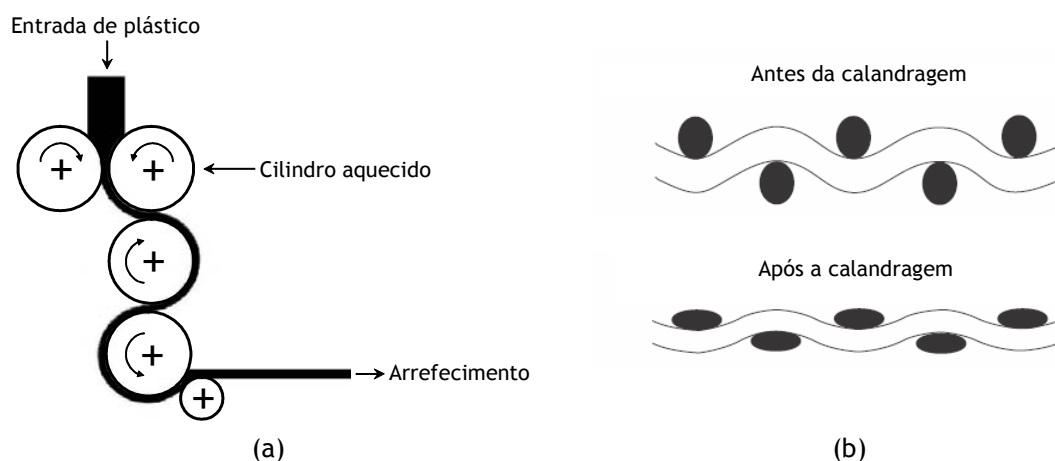


Figura 1.15 - Processo de fabrico de geomembranas por calandragem: (a) esquema geral (adaptado de [1]); (b) efeitos da calandragem (adaptado de [19]).

O processo de calandragem permite a formação de geomembranas reforçadas e não reforçadas. As reforçadas são produzidas através da inclusão de um geotêxtil entre as camadas das geomembranas (a adesão entre os diferentes componentes deve ser efectiva).

O processo de espalhamento superficial (o mais recente e o menos usado) consiste em espalhar um polímero (em estado de fusão) sobre um geotêxtil, revestindo-o; as geomembranas produzidas por este processo são reforçadas.

De acordo com a sua superfície, as geomembranas podem ser divididas em dois tipos: lisas e rugosas (ou texturadas). As geomembranas rugosas são muitas vezes produzidas a partir de geomembranas lisas em que, num passo adicional, é induzida a formação de uma textura (regular ou aleatória) na superfície dos materiais (existem vários métodos para o efeito: pulverização, impressão, laminação, entre outros). As rugosidades conduzem a um aumento do atrito na interface das geomembranas com outros materiais.

## 1.7 - Principais aplicações dos geossintéticos

Nos últimos trinta anos, os geossintéticos têm sido largamente aplicados nas mais variadas obras de Engenharia Civil (substituindo os materiais de construção tradicionais); a norma EN ISO 10318:2005 refere as principais aplicações dos geossintéticos (Figura 1.16).

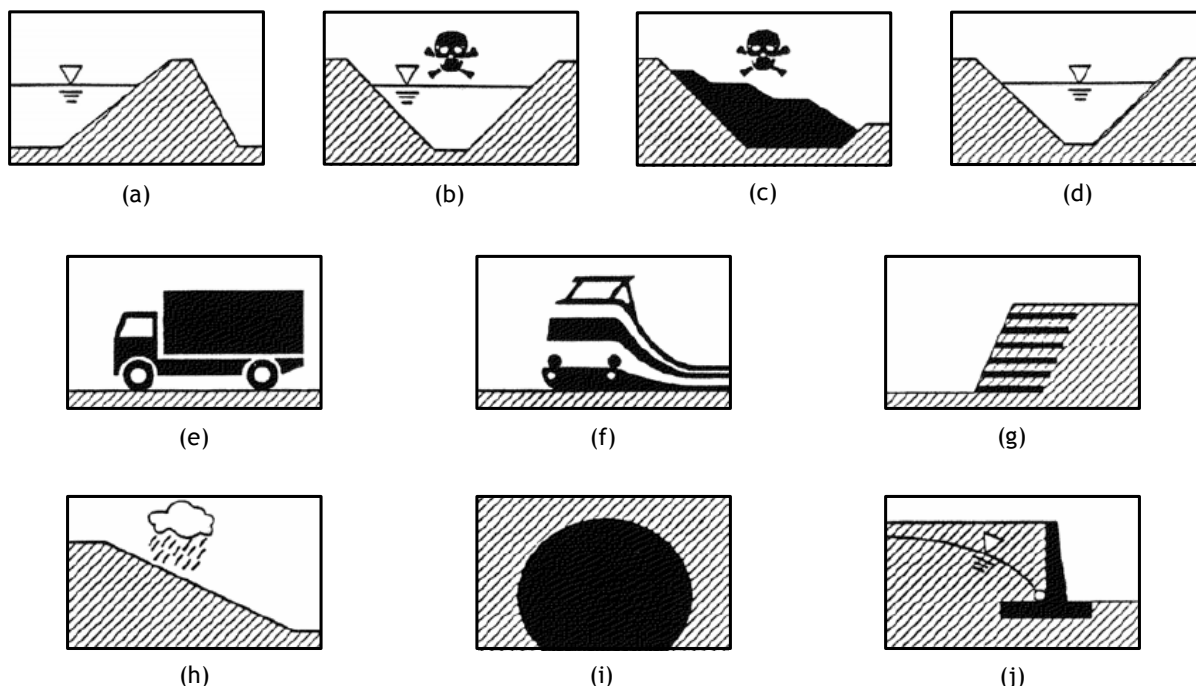


Figura 1.16 - Principais aplicações dos geossintéticos (EN ISO 10318:2005):

- (a) reservatórios e barragens; (b) depósitos de resíduos líquidos; (c) depósitos de resíduos sólidos; (d) canais; (e) obras rodoviárias; (f) obras ferroviárias; (g) fundações e estruturas de suporte; (h) sistemas de controlo da erosão; (i) túneis e estruturas subterrâneas; (j) sistemas de drenagem.

## 1.8 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se a uma breve discussão sobre alguns aspectos gerais dos geossintéticos, tais como a classificação dos materiais, as suas funções, as matérias-primas, o processo de fabrico e as principais aplicações.

Para a selecção dos geossintéticos a instalar numa dada obra, é necessário conhecer os valores das principais propriedades dos materiais; a determinação dessas propriedades pode ser feita de acordo com várias normas nacionais, europeias e internacionais. Assim, no próximo capítulo, procede-se à apresentação das principais propriedades dos geossintéticos, bem como dos métodos existentes para a sua quantificação; serão indicadas as principais normas desenvolvidas pelas comissões técnicas de normalização na área dos geossintéticos.

Por fim, os geossintéticos devem ser muito resistentes aos vários agentes de degradação (de modo a poderem funcionar correctamente durante todo o tempo de vida da estrutura onde estão inseridos); a garantia de durabilidade é indispensável nas diversas aplicações dos geossintéticos. A durabilidade dos geossintéticos (o tema central deste trabalho) será discutida no Capítulo 3.





# CAPÍTULO 2

## Normas e ensaios em geossintéticos.

### Propriedades dos geossintéticos

#### 2.1 - Introdução

Os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções (em simultâneo) nas diversas obras onde são aplicados. Para exercerem correctamente uma dada função, os geossintéticos devem possuir um conjunto adequado de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Além disso, devem apresentar uma boa resistência aos diferentes agentes de degradação (a degradação prematura dos materiais poderá pôr em causa a estabilidade e/ou a funcionalidade da estrutura onde estão inseridos).

O processo de selecção dos geossintéticos (a aplicar numa obra para o desempenho de determinadas funções) é feito com base nas propriedades dos materiais. A quantificação das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos pode ser feita através de métodos próprios desenvolvidos para o efeito. Existem, também, métodos para simular os danos que ocorrem durante o processo de instalação e durante o período de vida dos geossintéticos (por exemplo, métodos para determinar a resistência dos geossintéticos aos vários agentes de degradação físicos e/ou químicos).

Neste capítulo, procede-se à apresentação dos principais métodos existentes para a caracterização de geossintéticos; serão indicadas as normas mais relevantes actualmente existentes nesta área. Logo em seguida, procede-se a uma descrição das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos. Serão, ainda, identificados os principais agentes de danificação dos geossintéticos (a resistência dos materiais à degradação encontra-se descrita com maior detalhe no Capítulo 3).

#### 2.2 - Normas e ensaios em geossintéticos [20-25]

##### 2.2.1 - Considerações iniciais

Ao longo dos últimos anos, a comunidade científica internacional tem vindo a desenvolver uma série de procedimentos normalizados para determinar as propriedades dos geossintéticos. A quantificação dessas propriedades deve ser feita com especial cuidado, uma vez que os seus valores irão depender do procedimento de ensaio usado.

Nos pontos seguintes, faz-se uma apresentação de alguns organismos de normalização (nacionais, europeus e internacionais) e são indicadas as principais normas actualmente existentes na área dos geossintéticos.

### 2.2.2 - Organismos de normalização

Existem organismos de normalização nacionais, europeus e internacionais, todos com o objectivo de promover (nas suas áreas de actuação) a normalização e actividades relacionadas com a avaliação da conformidade.

Em Portugal, o organismo responsável pela normalização é o IPQ (Instituto Português da Qualidade), possuindo a colaboração de vários Organismos de Normalização Sectoriais (ONS). As funções dos ONS incluem o acompanhamento e a participação nas actividades normativas europeias e internacionais, bem como a promoção da aplicação das normas em Portugal; os ONS devem, também, proceder à anulação ou à revisão das normas nacionais que se encontrem em conflito com as normas europeias.

No caso particular dos geossintéticos, o ONS é o CITEVE (Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal), na comissão técnica CT4 (Comissão Técnica dos Têxteis e do Vestuário), subcomissão SC 6 (Geossintéticos).

No CEN (Comissão Europeia de Normalização), a normalização na área dos geossintéticos é tratada pela comissão técnica (TC) 189 (CEN TC 189); esta comissão foi criada em 1989, sendo designada, desde Dezembro de 1999, por “Geossintéticos” (em substituição da anterior designação “Geotêxteis e produtos relacionados”).

O objectivo do CEN TC 189 é o desenvolvimento de normas: de exigências dos geossintéticos para as várias aplicações específicas; de ensaios para quantificar as propriedades especificadas nas normas das exigências; com termos, definições e símbolos relativos aos geossintéticos; com recomendações para a selecção, para aplicações e para ensaios de geossintéticos. O CEN TC 189 funciona com seis grupos de trabalho (WG) (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Grupos de trabalho do CEN TC 189.

| Grupo de trabalho | Designação do grupo   |
|-------------------|---|
| WG1               | Exigências para os geotêxteis e produtos relacionados (marcação CE) |
|                   | Reforço de pavimentos (grupo <i>ad hoc</i> )                        |
| WG2               | Terminologia, identificação, amostragem e classificação             |
| WG3               | Ensaio mecânicos  |
| WG4               | Ensaio hidráulicos  |
| WG5               | Ensaio de durabilidade  |
| WG6               | Exigências para as barreiras geossintéticas (marcação CE)           |

Entre os organismos de normalização internacionais, inclui-se a ISO (Organização Internacional de Normalização). A ISO consiste numa rede de organismos de normalização nacionais de 148 países; os geossintéticos são tratados na TC 221 com a designação de “Geossintéticos”. A TC 221 está dividida em 5 grupos de trabalho: WG1 - Ligações com o CEN TC 189; WG2 - Terminologia, identificação e amostragem; WG 3 - Propriedades mecânicas; WG 4 - Propriedades hidráulicas; WG 5 - Durabilidade.

Portugal é membro participante do CEN TC 189 e da ISO TC 221. A adopção das normas europeias (EN e EN ISO) é de carácter obrigatório para todos os países membros do CEN (mesmo para os países que tenham votado contra a aprovação de uma dada norma). Algumas normas do CEN são adoptadas pela ISO (e vice-versa) no âmbito do Tratado de Viena.

Existem ainda outros organismos de normalização locais bastante conhecidos como a ANSI (*American National Standards Institute* - Estados Unidos da América), BSI (*British Standard Institution* - Reino Unido) ou DIN (*Deutsches Institut für Normung* - Alemanha).

### 2.2.3 - Normas CEN

As normas publicadas pelo CEN podem ser de vários tipos: EN (norma europeia a ser revista todos os 5 anos), ENV (norma europeia a nível experimental, válida durante 2 anos), EN ISO (norma europeia adoptada pela ISO, revista todos os 5 anos) e ENV ISO (norma ENV adoptada pela ISO, válida por um período de 2 anos). As normas que se encontram em processo de votação (documentos de trabalho do CEN) são designadas por prEN, prENV, prEN ISO ou prENV ISO. Existem ainda outros documentos provenientes do CEN: TS (especificação técnica, revista de 3 em 3 anos), TR (relatório técnico, sem limite de validade), *Guide* (guia, documento informativo, sem limite de validade) e CWA (acordo resultante de um *workshop* do CEN, pode ser revisto).

As normas europeias EN são publicadas (nas três línguas oficiais do CEN - inglês, francês e alemão) após as fases de inquérito público, aprovação e ratificação. As normas EN devem ser traduzidas para a língua de cada país, ficando com o estatuto de normas nacionais. As normas nacionais existentes que estejam em conflito com uma norma EN devem ser anuladas (ou revistas). As EN ISO possuem o mesmo estatuto das EN.

As especificações técnicas TS são documentos publicados pelo CEN que não obrigam à eliminação de normas nacionais contraditórias. No entanto, uma TS não pode estar em conflito com uma norma do CEN. As especificações técnicas são publicadas em, pelo menos, uma das três línguas oficiais do CEN e possuem uma duração máxima de 6 anos (revisão após 3 anos).

Os relatórios técnicos TR são documentos informativos (sem limite de validade) publicados em, pelo menos, uma das três línguas oficiais do CEN. Os relatórios técnicos TR fornecem informações sobre os conteúdos técnicos dos trabalhos de normalização.

Os *CEN Guides* são documentos informativos internos ao sistema do CEN disponibilizados em, pelo menos, uma das línguas oficiais do CEN. A informação contida nos *CEN Guides* engloba princípios e políticas de normalização e linhas orientadoras. Estes documentos não possuem limite de validade e são destinados aos agentes envolvidos na preparação das normas.

Os CWA são acordos técnicos provenientes de *workshops* do CEN (publicados em pelo menos uma língua oficial do CEN), resultantes do consenso entre individualidades e organizações identificadas, que são responsáveis pelo seu conteúdo. Os CWA não obrigam à anulação (ou à revisão) de normas

nacionais contraditórias (no entanto, não podem estar em conflito com uma norma europeia); estes documentos não possuem limite de validade.

Em Portugal, o ONS CT4 SC6 está a proceder à tradução para Português das normas do CEN, para facilitar a sua divulgação e implementação. As normas traduzidas e publicadas pelo IPQ ficam com a designação NP (Norma Portuguesa), seguida pela designação da norma europeia correspondente.

Os Quadros 2.2 a 2.6 resumem as normas com origem no CEN TC 189. Nas normas traduzidas para Português é indicada a referência das normas CEN originais e, nalguns casos, das emendas incluídas na tradução.

Quadro 2.2 - Normas de terminologia, identificação, amostragem e classificação de geossintéticos com origem no WG2 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                           | Nome   |
|----------------------------------|--|
| NP EN ISO 9862:2007<br>(Ed. 1)   | Geossintéticos - Amostragem e preparação de provetes (EN ISO 9862:2005)  |
| NP EN ISO 9863-1:2006<br>(Ed. 1) | Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples (EN ISO 9863-1:2005)   |
| EN ISO 9863-2:1996<br>(Ed. 1)    | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of thickness at specified pressures - Part 2: Procedure for determination of thickness of single layers of multilayer products |
| NP EN ISO 9864:2006<br>(Ed. 1)   | Geossintéticos - Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados (EN ISO 9864:2005)  |
| NP EN ISO 10318                  | Geossintéticos - Termos e definições. (EN ISO 10318:2005) (aguarda publicação)   |
| NP EN ISO 10320:2003<br>(Ed. 1)  | Geotêxteis e produtos relacionados - Identificação em obra (EN ISO 10320:1998)   |
| NP EN 14196:2007<br>(Ed. 1)      | Geossintéticos - Métodos de ensaio para a determinação da massa por unidade de área das barreiras geossintéticas argilosas (EN 14196:2003)   |

Quadro 2.3 - Normas para ensaios hidráulicos de geossintéticos com origem no WG4 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                          | Nome  |
|---------------------------------|---|
| NP EN ISO 11058:2003<br>(Ed. 1) | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento (ISO 11058: 1999) (EN ISO 11058: 1999) |
| NP EN ISO 12956:2006<br>(Ed. 1) | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da dimensão característica da abertura (ISO 12956: 1999) (EN ISO 12956:1999)  |
| NP EN ISO 12958:2005<br>(Ed. 1) | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano (ISO 12958: 1999) (EN ISO 12958:1999)  |
| EN 13562: 2000<br>(Ed. 1)       | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of resistance to penetration by water (Hydrostatic pressure test)   |
| NP EN 14150: 2008<br>(Ed. 1)    | Barreiras geossintéticas - Determinação da permeabilidade aos líquidos (EN 14150:2006)  |

Quadro 2.4 - Normas referentes às exigências dos geossintéticos com vista à marcação CE com origem nos WG1 e WG6 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                              | Nome  |
|-------------------------------------|---|
| NP EN 13249:2007<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de estradas e outras zonas de tráfego (excluindo vias férreas e pavimentos betuminosos) (EN 13249:2000; EN 13249:2000/A 1:2005) |
| NP EN 13250:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de vias férreas (EN 13250:2000; EN 13250:2000/A 1:2005)   |
| NP EN 13251: 2006<br>(Ed. 1)        | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em obras de terraplanagem, fundações e estruturas de suporte (EN 13251:2000; EN 13251:2000/A 1:2005)  |
| NP EN 13252:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em sistemas de drenagem (EN 13252:2000; EN 13252:2000/A 1:2005)   |
| NP EN 13253:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em obras para controlo da erosão (protecção costeira, revestimento das margens) (EN 13253:2000; EN 13253:2000/A 2:2005)                       |
| NP EN 13254:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de reservatórios e barragens (EN 13254:2000; EN 13254:2000/A 1:2005)  |
| NP EN 13255:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de canais (EN 13255:2000; EN 13255:2000/A 1:2005)   |
| NP EN 13256:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de túneis e estruturas subterrâneas (EN 13256:2000; EN 13256:2000/A 1:2005)   |
| NP EN 13257:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em depósitos de resíduos sólidos (EN 13257:2000; EN 13257:2000/A 1:2005)  |
| NP EN 13265:2006<br>(Ed. 1)         | Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em projectos de depósitos de resíduos líquidos (EN 13265:2000; EN 13265:2000/A 1:2005)  |
| NP EN 13361:2006<br>(Ed. 1)         | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização na construção de depósitos e barragens (EN 13361:2004)  |
| NP EN 13362:2007<br>(Ed. 1)         | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para utilização na construção de canais (EN 13362:2005)   |
| NP EN 13491: 2006<br>(Ed. 1)        | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização como barreira aos líquidos na construção de túneis e obras subterrâneas (EN 13491:2004)   |
| NP EN 13491:2006/A1:2008<br>(Ed. 1) | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização como barreira aos líquidos na construção de túneis e obras subterrâneas (EN 13491:2004/A1:2006)   |
| NP EN 13492:2007<br>(Ed. 1)         | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização na construção de estruturas de deposição de resíduos líquidos, estações de transferência ou confinamento secundário (EN 13492:2004)                     |
| NP EN 13492:2007/A1:2008<br>(Ed. 1) | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização na construção de estruturas de deposição de resíduos líquidos, estações de transferência ou confinamento secundário (EN 13492:2004/A1:2006)             |
| NP EN 13493:2007<br>(Ed. 1)         | Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização na construção de estruturas de armazenamento e de deposição de resíduos sólidos (EN 13493:2005)   |
| EN 15381:2008                       | Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in pavements and asphalt overlays  |
| EN 15382:2008                       | Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in transportation infrastructure   |

Quadro 2.5 - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos com origem no WG3 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                          | Nome   |
|---------------------------------|--|
| NP EN ISO 10319:2005 (Ed. 1)    | Geotêxteis - Ensaio de tracção em tiras largas (ISO 10319: 1993) (EN ISO 10319:1996)   |
| EN ISO 10319:2008 (Ed. 2)       | Geosynthetics - Wide-width tensile test (ISO 10319:2008)   |
| EN ISO 10321:2008 (Ed. 2)       | Geosynthetics - Tensile test for joints/seams by wide-width strip method (ISO 10321:2008)  |
| EN ISO 10722:2007 (Ed. 1)       | Geosynthetics - Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007) |
| NP EN ISO 12236:2008 (Ed. 2)    | Geossintéticos - Ensaio de punçoamento estático (ensaio CBR) (ISO 12236:2006) (EN ISO 12236:2006)  |
| NP EN ISO 12957-1: 2007 (Ed. 1) | Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de corte directo (ISO 12957-1:2005)   |
| NP EN ISO 12957-2: 2007 (Ed. 1) | Geossintéticos - Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio em plano inclinado (ISO 12957-2:2005)                                       |
| EN ISO 13426-1:2003 (Ed. 1)     | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the strength of internal structural junctions - Part 1: Geocells (ISO 12426-1: 2003)      |
| EN ISO 13426-2:2005 (Ed 1)      | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the strength of internal structural junctions - Part 1: Geocomposites (ISO 12426-2: 2005) |
| NP EN ISO 13427:2006 (Ed. 1)    | Geotêxteis e produtos relacionados - Simulação do dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante) (ISO 13427:1998) (EN ISO 13427:1998)                     |
| NP EN ISO 13428:2007 (Ed. 1)    | Geossintéticos - Determinação da eficácia de protecção de um geossintético contra danos por impacto (ISO 13428:2005) (EN ISO 13428:2005)                 |
| EN ISO 13431:1999 (Ed. 1)       | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and tensile creep rupture behaviour (ISO 13431:1999)                        |
| NP EN ISO 13433:2008 (Ed. 1)    | Geossintéticos - Ensaio de perfuração dinâmica (ensaio com queda de cone) (ISO 13433:2006) (EN ISO 13433:2006).  |
| EN 13719:2002 (Ed. 1)           | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of long term protection efficiency   |
| NP EN 13738:2007 (Ed. 1)        | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência ao arranque no solo (EN 13738:2004)   |
| EN 14574:2004 (Ed. 1)           | Geosynthetics - Determination of the pyramid puncture resistance of supported geosynthetics  |
| EN ISO 25619-1:2008             | Geosynthetics - Determination of compressive behaviour - Part 1: Compressive creep properties (ISO 25619-1:2008)   |
| EN ISO 25619-2:2008             | Geosynthetics - Determination of compressive behaviour - Part 2: Determination of short-term compression behaviour (ISO 25619-2:2008)                    |

Quadro 2.6 - Normas para ensaios de durabilidade de geossintéticos com origem no WG5 do CEN TC 189 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                         | Nome   |
|--------------------------------|--|
| NP EN 12224:2007 (Ed. 1)       | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência ao envelhecimento devido ao clima (EN 12224:2000)   |
| NP EN 12225:2006 (Ed. 1)       | Geotêxteis e produtos relacionados - Método para a determinação da resistência microbiológica através de um ensaio de enterramento no solo (EN 12225:2000)                               |
| NP EN 12226:2005 (Ed. 1)       | Geotêxteis e produtos relacionados - Ensaio gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade (EN 12226:2000)  |
| NP EN 12447:2006 (Ed. 1)       | Geotêxteis e produtos relacionados - Método de ensaio selectivo para a determinação da resistência à hidrólise na água (EN 12447:2001)   |
| NP ISO/TR 13434                | Geotêxteis e produtos relacionados - Directrizes sobre durabilidade (ISO/TS 13434: 2008) (CR ISO 13434:1998) (aguarda publicação)  |
| NP EN ISO 13437:2007 (Ed. 1)   | Geotêxteis e produtos relacionados - Método para instalação e extracção de amostras no solo e preparação de provetes para ensaios em laboratório (ISO 13437:1998) (EN ISO 13437:1998)    |
| NP EN ISO 13438:2006 (Ed. 1)   | Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência à oxidação (ISO 13438:2004) (EN ISO 13438: 2004)  |
| EN 14030:2001 (Ed. 1)          | Geotextiles and geotextile related-products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids (ISO/TR 12960:1998, modified)                            |
| EN 14030:2001/A 1:2003 (Ed. 1) | Geotextiles and geotextile related-products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids (ISO/TR 12960:1998, modified)                            |
| NP EN 14414:2007 (Ed. 1)       | Geossintéticos - Método de ensaio selectivo para a determinação da resistência química para utilização em aterros de resíduos (EN 14414:2004)  |
| NP EN 14415:2007 (Ed. 1)       | Barreiras geossintéticas - Método de ensaio para a determinação da resistência à lixiviação (EN 14415:2004)  |
| NP CEN/TS 14416                | Barreiras Geossintéticas - Método de ensaio para a determinação da resistência às raízes (CEN/TS 14416: 2005) (aguarda publicação)   |
| CEN/TS 14417:2005              | Geosynthetic Barriers - Test method for the determination of the influence of wetting-drying cycles on the permeability of clay geosynthetic barriers                                    |
| CEN/TS 14418:2005              | Geosynthetic Barriers - Test method for the determination of the influence of freezing-thawing cycles on the permeability of clay geosynthetic barriers                                  |
| NP EN 14575:2007 (Ed. 1)       | Barreiras geossintéticas - Método de ensaio para a determinação da resistência à oxidação (EN 14575:2005)  |
| NP EN 14576:2007 (Ed. 1)       | Geossintéticos - Método de ensaio para a determinação da resistência das barreiras geossintéticas poliméricas à fissuração por tensão provocada pelos agentes ambientais (EN 14576:2005) |
| NP CEN/TR 15019                | Geotêxteis e produtos relacionados - Controlo de qualidade em obra (CEN/TR 15019: 2005) (aguarda publicação)   |

#### 2.2.4 - Normas ISO

Os documentos disponibilizados pela ISO podem ser de diferentes tipos: ISO (norma internacional), PAS (especificação disponível publicamente), TS (especificação técnica), TR (relatório técnico), AWI (acordo técnico internacional) e *Guide* (guia técnico). As normas ISO em vigor da responsabilidade da TC 221 encontram-se resumidas no Quadro 2.7 (a maioria das normas ISO TC 221 tem como base as normas CEN correspondentes).

Quadro 2.7 - Normas ISO com origem na TC 221 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número                       | Nome  |
|------------------------------|---|
| ISO 9862:2005                | Geosynthetics - Sampling and preparation of test specimens  |
| ISO 9863-1:2005              | Geosynthetics - Determination of thickness at specified pressures - Part 1: Single layers   |
| ISO 9863-2:1996              | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of thickness at specified pressures - Part 2: Procedure for determination of thickness of single layers of multilayer |
| ISO 9864:2005                | Geosynthetics - Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products  |
| ISO 10318:2005               | Geosynthetics - Terms and definitions   |
| ISO 10319:2008               | Geosynthetics - Wide-width tensile test   |
| ISO 10320:1999               | Geotextiles and geotextile-related products - Identification on site  |
| ISO 10321:2008               | Geosynthetics - Tensile test for joints/seams by wide-width strip method  |
| ISO 10722:2007               | Geosynthetics - Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading - Damage caused by granular material  |
| ISO 11058:1999               | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load   |
| ISO 12236:2006               | Geosynthetics - Static puncture test (CBR test)   |
| ISO 12956:1999               | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the characteristic opening size  |
| ISO 12957-1:2005             | Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test   |
| ISO 12957-2:2005             | Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test   |
| ISO 12958:1999               | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the water flow capacity in their plane   |
| ISO/TR 12960:1998            | Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to liquids   |
| ISO 13426-1:2003             | Geotextiles and geotextile-related products - Strength of internal structural junctions - Part 1: Geocells  |
| ISO 13426-2:2005             | Geotextiles and geotextile-related products - Strength of internal structural junctions - Part 2: Geocomposites   |
| ISO 13427:1998               | Geotextiles and geotextile-related products - Abrasion damage simulation (sliding block test)   |
| ISO 13428:2005               | Geosynthetics - Determination of the protection efficiency of a geosynthetic against impact damage  |
| ISO 13431:1999               | Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behaviour  |
| ISO 13433:2006               | Geosynthetics - Dynamic perforation test (cone drop test)   |
| ISO/TS 13434:2008            | Geosynthetics - Guidelines for the assessment of durability   |
| ISO 13437:1998               | Geotextiles and geotextile-related products - Method for installing and extracting samples in soil, and testing specimens in laboratory   |
| ISO 13438:2004               | Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to oxidation   |
| ISO/TS 19708:2007            | Geosynthetics - Procedure for simulating damage under interlocking-concrete-block pavement by the roller compactor method   |
| ISO/TR 20432:2007            | Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement  |
| ISO/TR 20432:2007/Cor 1:2008 | Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement  |
| ISO 25619-1:2008             | Geosynthetics - Determination of compression behaviour - Part 1: Compressive creep properties   |
| ISO 25619-2:2008             | Geosynthetics - Determination of compression behaviour - Part 2: Determination of short-term compression behaviour  |



### 2.2.5 - Normas ASTM

As normas ASTM (*The American Society for Testing Materials*) são desenvolvidas nos Estados Unidos da América pela ANSI; estas normas possuem uma grande divulgação e aceitação internacional. As normas referentes aos geossintéticos são da responsabilidade da comissão ASTM D35; esta comissão encontra-se dividida em 11 subcomissões (Quadro 2.8).

Quadro 2.8 - Subcomissões da ASTM D35.

| Subcomissão | Nome                                   |
|-------------|--|
| D35.01      | Propriedades mecânicas                 |
| D35.02      | Propriedades relativas à durabilidade  |
| D35.03      | Permeabilidade e filtragem             |
| D35.04      | Geocompósitos bentoníticos             |
| D35.05      | Geossintéticos para controlo de erosão |
| D35.10      | Geomembranas                           |
| D35.90      | Executivo                              |
| D35.93      | Editorial e terminologia               |
| D35.94      | Estatística                            |
| D35.95      | Prémios                                |
| D35.96      | Ligação à ISO TC 221 - Geossintéticos  |

Em seguida, apresentam-se as normas ASTM desenvolvidas pelas subcomissões D35.01 (Quadro 2.9), D35.02 (Quadro 2.10), D35.03 (Quadro 2.11) e D35.10 (Quadro 2.12).

Quadro 2.9 - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.01 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número         | Nome   |
|----------------|--|
| D4354-99(2009) | Standard Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing  |
| D4533-04(2009) | Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles   |
| D4595-09       | Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method  |
| D4632-08       | Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles  |
| D4833-07       | Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Related Products  |
| D4884-09       | Standard Test Method for Strength of Sewn or Thermally Bonded Seams of Geotextiles   |
| D5261-92(2009) | Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles   |
| D5321-08       | Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method |
| D5818-06       | Standard Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics   |
| D6241-04(2009) | Standard Test Method for the Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe                           |

(o Quadro 2.9 continua na página seguinte)

| (continuação do Quadro 2.9) |  |
|-----------------------------|--|
| D6244-06                    | Standard Test Method for Vertical Compression of Geocomposite Pavement Panel Drains  |
| D6364-06                    | Standard Test Method for Determining the Short-Term Compression Behavior of Geosynthetics  |
| D6637-01(2009)              | Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method                                      |
| D6638-07                    | Standard Test Method for Determining Connection Strength Between Geosynthetic Reinforcement and Segmental Concrete Units (Modular Concrete Blocks) |
| D6706-01(2007)              | Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil   |
| D6916-06c                   | Standard Test Method for Determining the Shear Strength Between Segmental Concrete Units (Modular Concrete Blocks)                                 |
| D7005-03(2008)              | Standard Test Method for Determining the Bond Strength (Ply Adhesion) of Geocomposites   |
| D7179-07e1                  | Standard Test Method for Determining Geonet Breaking Force   |
| D7273-08                    | Standard Guide for Acceptance Testing Requirements for Geonets and Geonet Drainage Geocomposites   |

Quadro 2.10 - Normas para ensaios de durabilidade de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.02 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número         | Nome   |
|----------------|--|
| D1987-07       | Standard Test Method for Biological Clogging of Geotextile or Soil/Geotextile Filters  |
| D4355-07       | Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus        |
| D4594-96(2009) | Standard Test Method for Effects of Temperature on Stability of Geotextiles  |
| D4873-02(2009) | Standard Guide for Identification, Storage, and Handling of Geosynthetic Rolls and Samples   |
| D4886-88(2002) | Standard Test Method for Abrasion Resistance of Geotextiles (Sand Paper/Sliding Block Method)                                      |
| D5262-07       | Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics                       |
| D5322-98(2009) | Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids                      |
| D5397-07       | Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test |
| D5496-98(2009) | Standard Practice for In Field Immersion Testing of Geosynthetics  |
| D5596-03(2009) | Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics                      |
| D5721-08       | Standard Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes  |
| D5747-08       | Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids   |
| D5819-05       | Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability                                   |
| D5885-06       | Standard Test Method for Oxidative Induction Time of Polyolefin Geosynthetics by High-Pressure Differential Scanning Calorimetry   |

(o Quadro 2.10 continua na página seguinte)

(continuação do Quadro 2.10)

|                |  |
|----------------|--|
| D5970-09       | Standard Practice for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure   |
| D6213-97(2009) | Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geogrids to Liquids   |
| D6388-99(2005) | Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geonets to Liquids  |
| D6389-99(2005) | Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geotextiles to Liquids  |
| D6992-03(2009) | Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method |
| D7238-06       | Standard Test Method for Effect of Exposure of Unreinforced Polyolefin Geomembrane Using Fluorescent UV Condensation Apparatus   |
| D7361-07       | Standard Test Method for Accelerated Compressive Creep of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method               |
| D7406-07       | Standard Test Method for Time-Dependent (Creep) Deformation Under Constant Pressure for Geosynthetic Drainage Products   |
| D7409-07e1     | Standard Test Method for Carboxyl End Group Content of Polyethylene Terephthalate (PET) Yarns  |

Quadro 2.11 - Normas para ensaios de geossintéticos com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.3 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número            | Nome  |
|-------------------|---|
| D4491-99a(2004)e1 | Standard test methods for water permeability of geotextiles permittivity  |
| D4716-08          | Standard test method for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of geosynthetic using a constant head             |
| D4751-04          | Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile  |
| D5101-01(2006)    | Standard test method for measuring the soil-geotextile system clogging potential by the gradient ratio  |
| D5141-09          | Standard test method for determining filtering efficiency and flow rate of the filtration component of a sediment retention device using site-specific soil |
| D5199-01(2006)    | Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics   |
| D5493-06          | Standard test method for permittivity of geotextiles under load   |
| D5567-94(2006)    | Standard test method for hydraulic conductivity ratio (HCR) testing of soil/geotextile systems  |
| D6088-06          | Standard practice for installation of geocomposite pavement drains  |
| D6140-00(2005)    | Standard test method to determine asphalt retention of paving fabrics used in asphalt paving for full-width applications                                    |
| D6523-00(2005)    | Standard guide for evaluation and selection of alternative daily covers (ADCs) for sanitary landfills   |
| D6574-00(2006)    | Standard test method for determining the (in-plane) hydraulic transmissivity of a geosynthetic by radial flow   |
| D6707-06          | Standard specification for circular-knit geotextile for use in subsurface drainage applications   |

(o Quadro 2.11 continua na página seguinte)

| (continuação do Quadro 2.11) |   |
|------------------------------|---|
| D6767-08                     | Standard test method for pore size characteristics of geotextiles by capillary flow test  |
| D6817-07                     | Standard specification for rigid cellular polystyrene geofoam   |
| D6826-05                     | Standard specification for sprayed slurries, foams and indigenous materials used as alternative daily cover for municipal solid waste landfills |
| D6917-03(2007)               | Standard guide for selection of test methods for prefabricated vertical drains (PVD)  |
| D6918-03(2007)               | Standard test method for testing vertical strip drains in the crimped condition   |
| D7001-06                     | Standard specification for geocomposites for pavement edge drains and other high-flow applications  |
| D7008-08                     | Standard specification for geosynthetic alternate daily covers  |
| D7178-06                     | Standard practice for determining the number of constrictions “m” of non-woven geotextiles as a complementary filtration property               |
| D7180-05                     | Standard guide for use of expanded polystyrene (EPS) geofoam in geotechnical projects   |
| D7239-06                     | Standard specification for hybrid geosynthetic paving mat for highway applications  |
| D7489-09                     | Standard test method for vertical strip drains using a large scale consolidation test   |
| D7557-09                     | Standard practice for sampling of expanded polystyrene geofoam specimens  |

Quadro 2.12 - Normas para ensaios de geomembranas com origem na ASTM D35 - subcomissão D35.10 (normas activas em Setembro de 2009).

| Número         | Nome   |
|----------------|--|
| D2643-08       | Standard Specification for Prefabricated Asphalt Reservoir, Pond, Canal, and Ditch Liner (Exposed Type)  |
| D4437-08       | Standard Practice for Non-destructive Testing (NDT) for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes |
| D4885-01(2006) | Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method                                       |
| D5323-92(2006) | Standard Practice for Determination of 2% Secant Modulus for Polyethylene Geomembranes   |
| D5494-93(2006) | Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture Resistance of Unprotected and Protected Geomembranes                              |
| D5514-06       | Standard Test Method for Large Scale Hydrostatic Puncture Testing of Geosynthetics   |
| D5617-04       | Standard Test Method for Multi-Axial Tension Test for Geosynthetics  |
| D5641-94(2006) | Standard Practice for Geomembrane Seam Evaluation by Vacuum Chamber  |
| D5820-95(2006) | Standard Practice for Pressurized Air Channel Evaluation of Dual Seamed Geomembranes   |
| D5884-04a      | Standard Test Method for Determining Tearing Strength of Internally Reinforced Geomembranes  |
| D5886-95(2006) | Standard Guide for Selection of Test Methods to Determine Rate of Fluid Permeation Through Geomembranes for Specific Applications                |
| D5994-98(2003) | Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembrane  |

(o Quadro 2.12 continua na página seguinte)

(continuação do Quadro 2.12)

|                |  |
|----------------|--|
| D6214-98(2008) | Standard Test Method for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Geomembranes by Chemical Fusion Methods  |
| D6365-99(2006) | Standard Practice for the Nondestructive Testing of Geomembrane Seams using the Spark Test   |
| D6392-08       | Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods   |
| D6434-04       | Standard Guide for the Selection of Test Methods for Flexible Polypropylene (fPP) Geomembranes   |
| D6455-05       | Standard Guide for the Selection of Test Methods for Prefabricated Bituminous Geomembranes (PBGM)  |
| D6497-02       | Standard Guide for Mechanical Attachment of Geomembrane to Penetrations or Structures  |
| D6636-01(2006) | Standard Test Method for Determination of Ply Adhesion Strength of Reinforced Geomembranes   |
| D6693-04       | Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes  |
| D6747-04       | Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembrane   |
| D7002-03       | Standard Practice for Leak Location on Exposed Geomembranes Using the Water Puddle System  |
| D7003-03(2008) | Standard Test Method for Strip Tensile Properties of Reinforced Geomembranes   |
| D7004-03(2008) | Standard Test Method for Grab Tensile Properties of Reinforced Geomembranes  |
| D7006-03(2008) | Standard Practice for Ultrasonic Testing of Geomembranes   |
| D7007-09       | Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials   |
| D7056-07       | Standard Test Method for Determining the Tensile Shear Strength of Pre-Fabricated Bituminous Geomembrane Seams   |
| D7106-05       | Standard Guide for Selection of Test Methods for Ethylene Propylene Diene Terpolymer (EPDM) Geomembranes   |
| D7176-06       | Standard Specification for Non-Reinforced Polyvinyl Chloride (PVC) Geomembranes Used in Buried Applications  |
| D7177-05       | Standard Specification for Air Channel Evaluation of Polyvinyl Chloride (PVC) Dual Track Seamed Geomembranes   |
| D7240-06       | Standard Practice for Leak Location using Geomembranes with an Insulating Layer in Intimate Contact with a Conductive Layer via Electrical Capacitance Technique (Conductive Geomembrane Spark Test) |
| D7272-06       | Standard Test Method for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Geomembranes by Pre-manufactured Taped Methods   |
| D7274-06a      | Standard Test Method for Mineral Stabilizer Content of Prefabricated Bituminous Geomembranes (BGM)   |
| D7275-07       | Standard Test Method for Tensile Properties of Bituminous Geomembranes (BGM)   |
| D7407-07       | Standard Guide for Determining The Transmission of Gases Through Geomembranes  |
| D7408-08       | Standard Specification for Non Reinforced PVC (Polyvinyl Chloride) Geomembrane Seams   |
| D7465-08       | Standard Specification for Ethylene Propylene Diene Terpolymer (EPDM) Sheet Used in Geomembrane Applications   |
| D7466-08       | Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane   |

### 2.2.6 - Considerações finais

Nos últimos anos, os diferentes organismos de normalização têm vindo a desenvolver vários métodos para: (1) medir as propriedades dos geossintéticos e (2) determinar a resistência dos materiais aos diversos agentes de degradação. Em alguns casos, os métodos da ISO, do CEN e da ASTM são muito idênticos. No entanto, em várias situações, existem métodos muito distintos para a determinação da mesma propriedade e/ou característica. Assim, é indispensável indicar sempre o método utilizado (a adopção dos métodos do CEN TC 189 - sempre que existentes - é obrigatória em Portugal). O Quadro 2.13 compara algumas normas com origem nos diferentes organismos de normalização referidos nos pontos anteriores: ISO TC 221, CEN TC 189 e ASTM D35.

Quadro 2.13 - Comparação de algumas normas com origem na ISO TC 221, no CEN TC 189 e na ASTM D35 (normas activas em Setembro de 2009).

| Tema   | ISO TC 221   | CEN TC 189   | ASTM D35   |
|--|--|--|--|
| Terminologia e vocabulário   | ISO 10318:2005                                     | EN ISO 10318:2005  | D4439-04   |
| Amostragem e preparação de provetes                                    | ISO 9862:2005                                      | EN ISO 9862:2005   | D4354-99(2009)   |
| Determinação da massa por unidade de área                              | ISO 9864:2005                                      | EN ISO 9864:2005<br>EN 14196:2003  | D5261-92(2009)<br>D5993-99(2004)   |
| Determinação da espessura  | ISO 9863-1:2005<br>ISO 9863-2:1996                 | EN ISO 9863-1:2005<br>EN ISO 9863-2:1996   | D5199-01(2006)<br>D5994-98(2003)<br>D6525-00(2006)   |
| Determinação de propriedades de tracção (ensaio com tiras largas)      | ISO 10319:2008                                     | EN ISO 10319:2008  | D4595-09<br>D4885-01(2006)   |
| Determinação da resistência ao punçoamento e da resistência ao impacto | ISO 12236:2006<br>ISO 13428:2005<br>ISO 13433:2006 | EN ISO 12236:2006<br>EN ISO 13433:2006<br>EN ISO 13428:2005<br>EN 14574:2004             | D4833-07<br>D5494-93(2006)<br>D5514-06<br>D6241-04(2009)   |
| Determinação da resistência ao rasgamento                              | ---  | ---  | D4533-04(2009)<br>D5884-04a  |
| Determinação da permeabilidade à água normal ao plano                  | ISO 11058:1999                                     | EN ISO 11058:1999  | D4491-99a(2004)e1<br>D5493-06  |
| Directrizes sobre durabilidade   | ISO/TS 13434:2008                                  | CR ISO 13434:1998  | D5819-05   |
| Resistência aos agentes químicos                                       | ISO/TR 12960:1998                                  | EN 12447:2001<br>EN 14030:2001<br>EN14030:2001/A1:2003<br>EN 14414:2004<br>EN 14415:2004 | D5322-98(2009)<br>D5496-98(2009)<br>D5747-08<br>D6213-97(2009)<br>D6388-99(2005)<br>D6389-99(2005) |
| Resistência à oxidação   | ISO 13438:2004                                     | EN ISO 13438:2004<br>EN 14575:2005   | D5721-08<br>D5885-06   |
| Resistência aos agentes climatéricos                                   | ---  | EN 12224:2000  | D4355-07<br>D5970-09<br>D7238-06   |
| Resistência aos agentes do solo  | ISO 13437:1998                                     | EN 12225:2000<br>EN ISO 13437:1998<br>CEN/TS 14416:2005                                  | D1987-07   |

## 2.3 - Propriedades dos geossintéticos

### 2.3.1 - Considerações iniciais

Os geossintéticos devem possuir um conjunto de propriedades para desempenharem correctamente as funções para as quais foram instalados. O dimensionamento deve ter em conta as acções a que os materiais vão estar sujeitos durante as operações de instalação em obra e durante o tempo de vida da estrutura onde estão inseridos.

As propriedades dos geossintéticos são normalmente divididas em físicas, mecânicas, hidráulicas e relativas à durabilidade. No entanto, muitas destas últimas (como a resistência à abrasão ou como a resistência aos agentes físicos e/ou químicos de degradação), não são realmente “propriedades” dos geossintéticos, mas sim uma indicação dos danos que os materiais podem, ou não, sofrer durante o seu tempo de vida.

As propriedades físicas dos geossintéticos incluem normalmente a densidade relativa dos polímeros, a massa por unidade de área, a espessura e a distribuição e dimensão das aberturas (muitos autores classificam esta última propriedade como hidráulica).

As propriedades mecânicas dos geossintéticos mais comuns englobam as propriedades de tracção, a resistência ao rasgamento, a resistência ao punçoamento (estático e dinâmico) e as propriedades de atrito nas interfaces. A fluência (frequentemente incluída nas propriedades relativas à durabilidade) pode também ser considerada uma propriedade mecânica.

As propriedades hidráulicas dos geossintéticos incluem vulgarmente a permeabilidade à água normal ao plano (permissividade) e a permeabilidade à água no plano (transmissividade).

Em seguida, procede-se a uma descrição das principais propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos. A danificação durante a instalação e a abrasão (vulgarmente classificadas como propriedades relativas à durabilidade) serão discutidas no ponto 2.4; a resistência aos vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos será também abordada nesse ponto.

### 2.3.2 - Propriedades físicas

#### 2.3.2.1 - Densidade relativa [4, 5, 21]

A densidade relativa dos geossintéticos é a razão entre a massa volúmica dos plásticos constituintes e a massa volúmica da água a 4 °C ( $1,000 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Os geossintéticos baseados em poliésteres e em nylons possuem uma densidade relativa superior a um (e daí afundam-se em água), enquanto que os geossintéticos de PE e de PP tem uma densidade relativa inferior à unidade (e daí flutuam na água).

No caso particular do PE, a densidade relativa é uma propriedade muito importante; é usada como modo de classificação do polímero (baixa, média e alta densidade). Quando são adicionados aditivos aos polímeros, a densidade relativa do plástico resultante pode ser maior ou menor que a densidade relativa do polímero base (dependendo da densidade relativa e da quantidade do aditivo usado).

As normas ASTM D792-08 e ASTM D1505-03 descrevem procedimentos para a determinação da massa volúmica de polímeros.

#### **2.3.2.2 - Massa por unidade de área** [4, 5, 21]

A massa por unidade de área dos geossintéticos (também designada por gramagem) é expressa em  $\text{g.m}^{-2}$ . Para geotêxteis e geogrelhas, a massa por unidade de área está normalmente compreendida entre 100 e 1000  $\text{g.m}^{-2}$ .

A massa por unidade de área fornece algumas indicações sobre o custo dos geossintéticos, pode ser um indicador dos valores de algumas propriedades mecânicas (como a resistência à tracção ou como a resistência ao punção estático) e é muitas vezes utilizada (de forma errada) para identificar o geossintético a usar numa dada aplicação. A massa por unidade de área pode, também, ser usada para controlar a qualidade dos geossintéticos durante o processo de fabrico, dando indicações sobre a uniformidade dos produtos.

Os métodos mais comuns para determinar a massa por unidade de área de geossintéticos incluem a EN ISO 9864:2005, a EN 14196:2003, a ASTM D5261-92(2009) e a ASTM D5993-99(2004); o método da norma NP EN ISO 9864:2006 encontra-se detalhadamente descrito no ponto 4.3.

#### **2.3.2.3 - Espessura** [4, 5, 21]

A espessura é a distância (em mm) entre a superfície superior e inferior de um dado geossintético, medida para uma determinada pressão.

As propriedades mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos são normalmente influenciadas pela sua espessura: quanto maior a espessura, maior a massa por unidade de área e maiores os valores das propriedades mecânicas em geral (para materiais com uma estrutura idêntica); a transmissividade (e outras propriedades hidráulicas) dos geotêxteis não-tecidos e das georredes é muito influenciada pela espessura dos materiais. Relativamente às geomembranas, quanto maior a espessura, maior a resistência aos danos mecânicos (impacto, fendas, perfuração) e menor o *stress* operacional. De um modo geral, a espessura dos geotêxteis varia entre os 0,25 e os 7,5 mm, enquanto que a espessura das geomembranas varia entre os 0,1 e os 50 mm.

A espessura dos geotêxteis é normalmente determinada de acordo com a EN ISO 9863-1:2005 ou com a ASTM D5199-01(2006); a espessura dos geotêxteis pode também ser determinada através da norma ASTM D1777-96(2007). Por sua vez, a espessura das geomembranas pode ser determinada de acordo com as normas ASTM D5199-01(2006) ou ASTM D5994-98(2003). O método da NP EN ISO 9863-1:2006 encontra-se detalhadamente descrito no ponto 4.4.

#### **2.3.2.4 - Distribuição e dimensão das aberturas** [5, 21]

Os geossintéticos usados como filtros devem exercer duas funções em simultâneo: devem permitir o fluxo de água ou de outro fluido ao longo da interface solo-geossintético e, ao mesmo tempo, não devem permitir uma remoção excessiva das partículas finas do solo. A distribuição e a dimensão das



aberturas (ou poros) são parâmetros fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros. Assim, muitos autores incluem estes parâmetros no grupo das propriedades hidráulicas [3, 4, 21].

Alguns geossintéticos (como georredes ou geogrelhas) possuem aberturas relativamente uniformes, podendo ser facilmente caracterizadas pela medição de uma delas. Pelo contrário, as aberturas dos geotêxteis não possuem um tamanho único, mas sim um intervalo de tamanhos.

A distribuição e a dimensão das aberturas dos geotêxteis estão directamente relacionadas com o seu processo de fabrico (estrutura). De um modo geral, os geotêxteis tecidos possuem aberturas mais ou menos uniformes com uma distribuição relativamente regular (pequena variação das dimensões das aberturas em torno do valor médio). Por sua vez, nos geotêxteis não-tecidos o intervalo de variação das dimensões das aberturas é muito mais alargado e a distribuição das aberturas é pouco regular.

A caracterização das aberturas dos geossintéticos é normalmente efectuada através das normas EN ISO 12956:1999 (peneiração húmida) e ASTM D4751-04 (peneiração seca); estes ensaios permitem a representação de curvas de dimensão e de distribuição das aberturas (curvas semelhantes às usadas para representar a granulometria de um solo). A dimensão característica da abertura ( $O_n$ ) pode ser definida a partir destas curvas; o valor de  $O_n$  indica que  $n\%$  das aberturas do geossintético possuem uma dimensão igual ou inferior a esse valor.

### 2.3.3 - Propriedades mecânicas

#### 2.3.3.1 - Propriedades de tracção [4, 5, 21]

As propriedades de tracção dos geossintéticos são normalmente determinadas através de ensaios de tracção-extensão. Para os geotêxteis, os ensaios de tracção-extensão mais comuns incluem a EN ISO 10319:2008 e a ASTM D4595-09 (métodos com tiras largas); podem também ser usados métodos com tiras estreitas (EN 29073-3:1992 ou EN ISO 13934-1:1999). Os procedimentos das normas NP EN ISO 10319:2005 e NP EN 29073-3:1993 encontram-se descritos nos pontos 4.5 e 4.6, respectivamente; o método da norma NP EN ISO 13934-1:2001 encontra-se descrito no ponto 12.3.

Os ensaios de tracção-extensão mais comuns em geomembranas incluem a ASTM D4885-01(2006), a ASTM D638-08 e a ASTM D882-09; os procedimentos da norma ASTM D638-08 encontram-se descritos no ponto 13.3.2.

A resposta dos geossintéticos aos ensaios de tracção-extensão é normalmente caracterizada por uma curva que relaciona a força por unidade de largura (em  $\text{kN.m}^{-1}$ ) com a extensão (em %). Para obter tensões seria necessário dividir a força por unidade de largura pela espessura do geossintético. Tal não é vulgarmente usado, dado que a espessura da maioria destes materiais varia muito com a carga aplicada e durante o processo de extensão (apenas para as geomembranas é comum usar tensões).

Os parâmetros mecânicos obtidos a partir das curvas de força-extensão dos geotêxteis normalmente incluem a resistência à tracção (força máxima por unidade de largura), a extensão na força máxima e/ou na rotura, o módulo de rigidez e a robustez. Para as geomembranas, os parâmetros mecânicos

normalmente usados incluem a tensão máxima e a deformação correspondente, a tensão na rotura e a deformação correspondente e o módulo de deformabilidade inicial; a Figura 2.1 compara as curvas de tensão-deformação obtidas para algumas geomembranas.

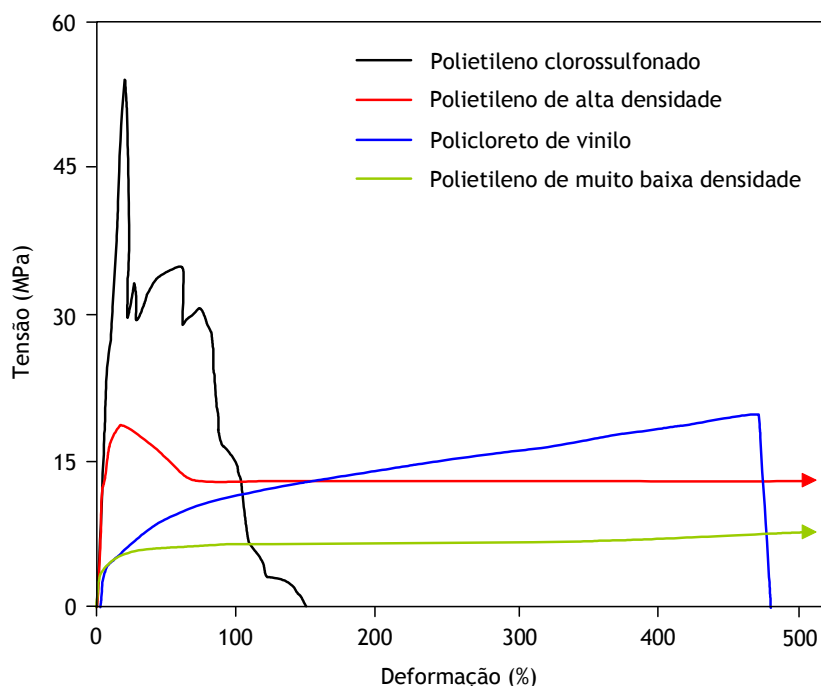


Figura 2.1 - Curvas tensão-deformação de algumas geomembranas (adaptado de [4]).

A resistência à tracção é provavelmente a propriedade isolada mais importante dos geossintéticos; esta propriedade é função do tipo de polímero e do processo de fabrico que origina a estrutura do produto final. A resistência à tracção de geotêxteis idênticos (do mesmo tipo, fabricados do mesmo modo) é dependente da massa por unidade de área: é comum encontrar uma relação linear entre a massa por unidade de área e a resistência à tracção. Para a mesma massa por unidade de área, os geotêxteis tecidos tem normalmente maior resistência à tracção que os geotêxteis não-tecidos. A Figura 2.2 ilustra a variação da resistência à tracção com a massa por unidade de área.

Os geotêxteis mais resistentes são os tecidos de poliésteres, podendo ter resistências à tracção de  $1000 \text{ kN.m}^{-1}$  para extensões entre 10 e 15% (a massa por unidade de área de um geotêxtil deste tipo poderá atingir as  $2000 \text{ g.m}^{-2}$ ). Os geotêxteis tecidos de PP raramente possuem resistências à tracção superiores a  $250 \text{ kN.m}^{-1}$ ; a maioria destes materiais tem resistências à tracção entre os 10 e os  $50 \text{ kN.m}^{-1}$  (para extensões entre 10 e 25%). A resistência à tracção dos geotêxteis não-tecidos (PP ou PET) raramente é superior a  $50 \text{ kN.m}^{-1}$  (para a maioria dos materiais, resistências à tracção entre 5 e  $20 \text{ kN.m}^{-1}$  com extensões na força máxima entre 30 e 80%). A Figura 2.3 compara o aspecto geral das curvas força-extensão de alguns tipos de geotêxteis.

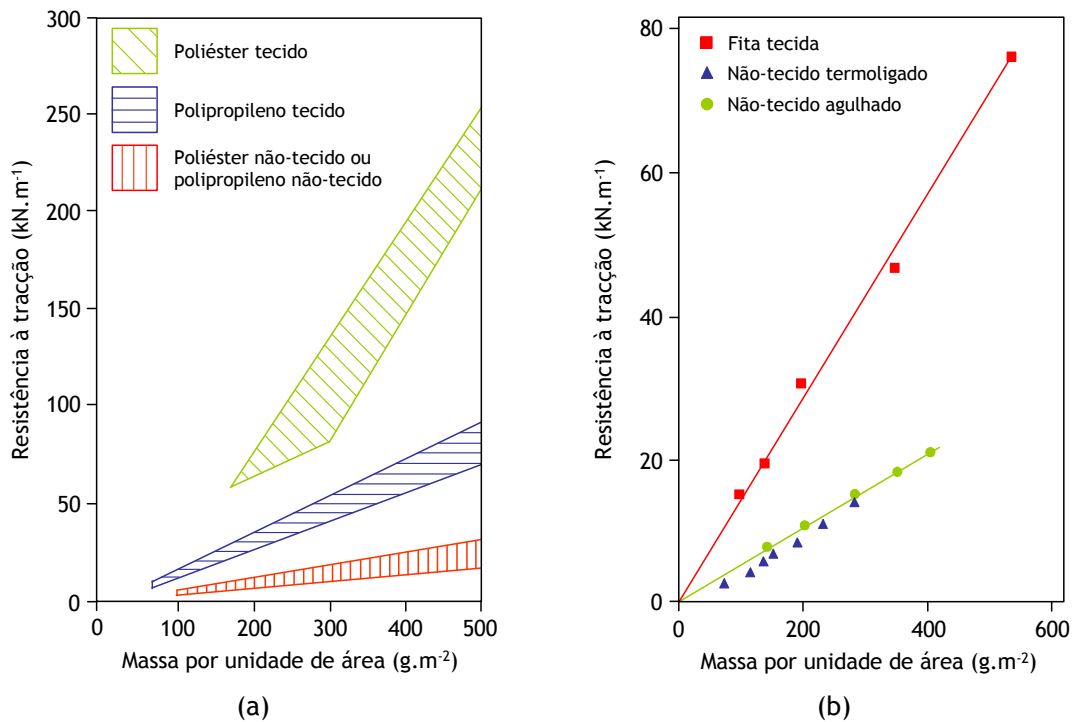


Figura 2.2 - Geotêxteis: variação da resistência à tracção com a massa por unidade de área: (a) geotêxteis com várias estruturas (adaptado de [5]); (b) geotêxteis de PP (adaptado de [26]).

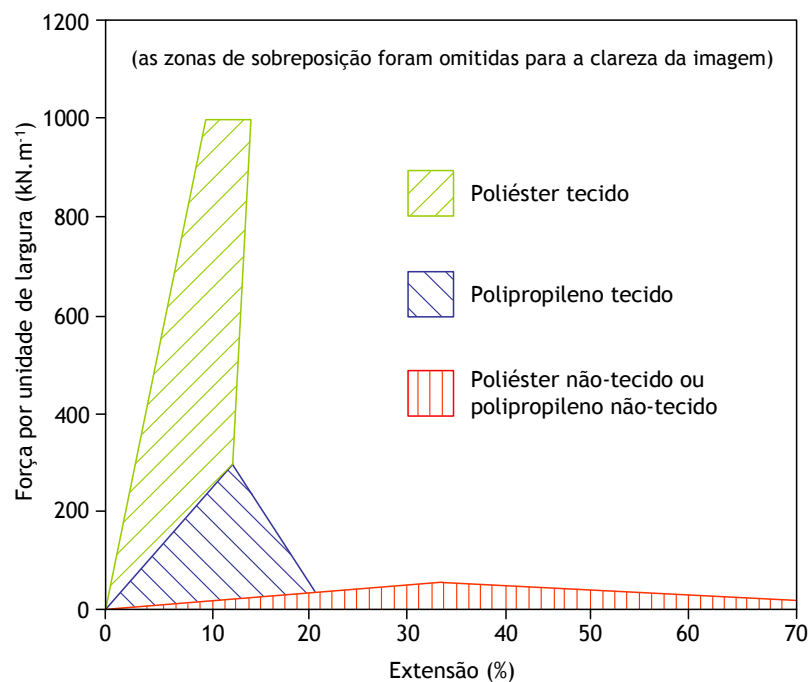


Figura 2.3 - Aspecto geral das curvas força-extensão de alguns geotêxteis (adaptado de [5]).

### 2.3.3.2 - Fluência e rotura em fluência [21]

A fluência é a deformação ao longo do tempo de um geossintético submetido a uma carga ou a uma tensão constante; é um aspecto bastante significativo no dimensionamento dos geossintéticos, em particular, para tempos de serviço longos. A fluência dos geossintéticos depende essencialmente do tipo de polímero; o processo de fabrico (estrutura) tem uma influência reduzida.

A rotura em fluência está relacionada com a rotura brusca dos geossintéticos após um longo período de tempo sob carga constante. Nestas situações, não há alterações significativas da resistência do material, até que, subitamente, a sua resistência decresce rapidamente até atingir o valor da carga aplicada (momento em que ocorre a rotura do geossintético).

Os métodos mais usados para avaliar a fluência e a rotura em fluência incluem a EN ISO 13431:1999 e a ASTM D5262-07. A Figura 2.4 ilustra o equipamento existente no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) para a realização de ensaios de fluência e de rotura em fluência; a determinação das características de fluência dos geossintéticos tem vindo a ser alvo de estudos no LGS da FEUP [3, 27].

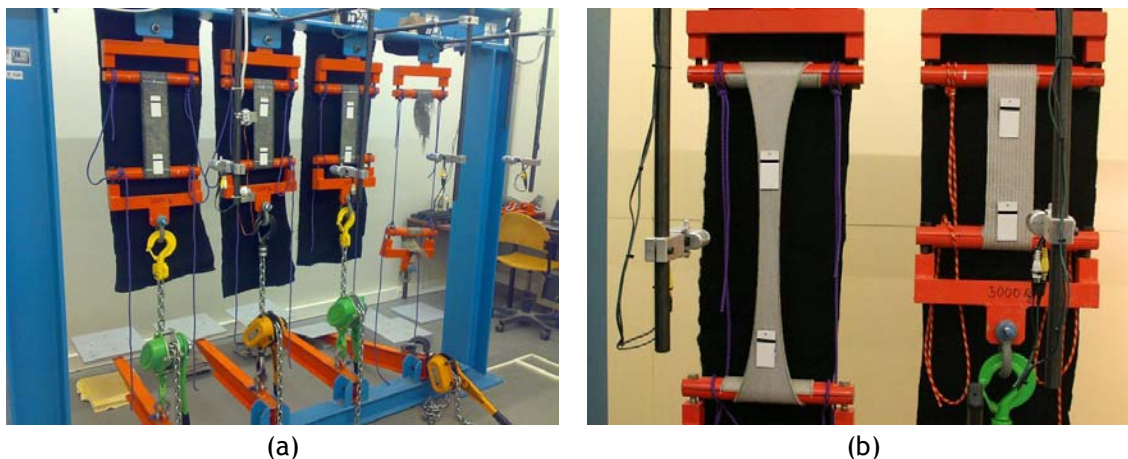


Figura 2.4 - Equipamento do LGS para a realização de ensaios de fluência e de rotura em fluência: (a) vista geral de um pórtico; (b) geotêxteis no início (à direita) e durante (à esquerda) um ensaio.

#### **2.3.3.3 - Resistência ao rasgamento**

Os geossintéticos podem estar sujeitos a tensões de rasgamento nas suas mais variadas aplicações; a força de rasgamento (em N) mede a resistência dos geossintéticos à propagação de rasgos locais. O CEN TC 189 não desenvolveu nenhuma metodologia para determinar a resistência dos geossintéticos ao rasgamento. Os métodos actualmente existentes para este efeito são provenientes da ASTM D35: a ASTM D4533-04(2009) (para geotêxteis) e a ASTM D5884-04a (para geomembranas reforçadas com têxteis).

A resistência ao rasgamento dos geotêxteis (ASTM D1424-09 e ASTM D2261-07a) e das geomembranas (ASTM D1004-09 e ASTM D1938-08) também pode ser determinada através de métodos desenvolvidos pela ASTM D13 (Têxteis) e pela ASTM D20 (Plásticos), respectivamente. Os métodos das normas ASTM D4533-04(2009) e ASTM D1004-09 encontram-se descritos nos pontos 4.7 e 13.3.3, respectivamente.

#### **2.3.3.4 - Resistência ao punçoamento [4, 21]**

A resistência ao punçoamento é inversamente proporcional à vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques causados pela queda de materiais; é importante determinar a resistência dos geossintéticos ao punçoamento sob condições estáticas e sob condições dinâmicas (testes de impacto).

Os métodos usados para determinar a resistência ao punçoamento estático envolvem normalmente a medição da força máxima (em N) necessária para um pilão de aço atravessar uma amostra circular de um geossintético (amostra perpendicular à direcção do deslocamento do pilão). Os métodos mais usados para determinar a resistência dos geossintéticos ao punçoamento estático englobam a EN ISO 12236:2006, a ASTM D4833-07 e a ASTM D6241-04(2009); os procedimentos da NP EN ISO 12236:2008 encontram-se detalhadamente descritos no ponto 4.8.

A queda de objectos (como rochas, ferramentas ou outros itens de construção) pode causar cortes ou perfurações nos geossintéticos. Os testes de impacto envolvem normalmente a queda livre de um objecto de massa conhecida (um cone metálico) em cima de um geossintético (montado firmemente num suporte oco); a resistência ao impacto é determinada com base na extensão da penetração do objecto no geossintético (Figura 2.5). A resistência ao impacto pode ser determinada através da EN ISO 13433:2006 ou através da ASTM D1709-09.

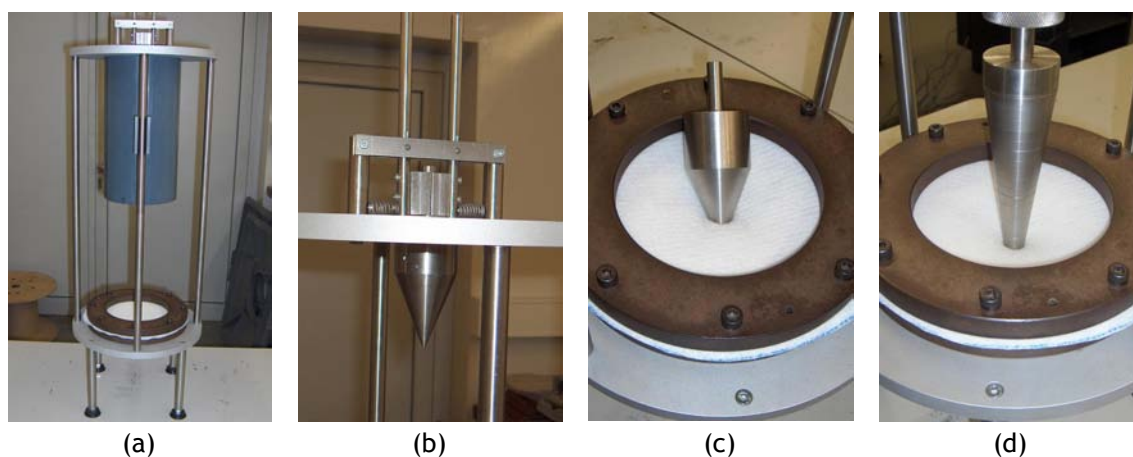


Figura 2.5 - Equipamento do LGS para a realização de ensaios de punçoamento dinâmico: (a) vista geral; (b) cone metálico (antes da queda); (c) cone metálico (após a queda); (d) medição da penetração do cone metálico no geossintético.

### 2.3.3.5 - Atrito nas interfaces [21]

Dentro das propriedades mecânicas, o atrito nas interfaces é uma das mais importantes quando os geossintéticos desempenham funções de reforço. A transferência de tensões do solo (ou de um outro material de construção) para o reforço é feita através da interacção entre eles.

A caracterização da interacção entre o solo e os geossintéticos ou entre qualquer outro material de construção e os geossintéticos pode ser efectuada através de diversos métodos: corte directo, corte em plano inclinado e arranque. Em Portugal, o LGS da FEUP possui equipamentos para a realização destes três tipos de ensaios (Figura 2.6).

Os ensaios de corte directo podem ser realizados através das normas EN ISO 12957-1:2004 e ASTM D5321-08; no LGS da FEUP tem vindo a ser efectuados estudos sobre as características de atrito dos geossintéticos, usando o método de corte directo [28, 29].



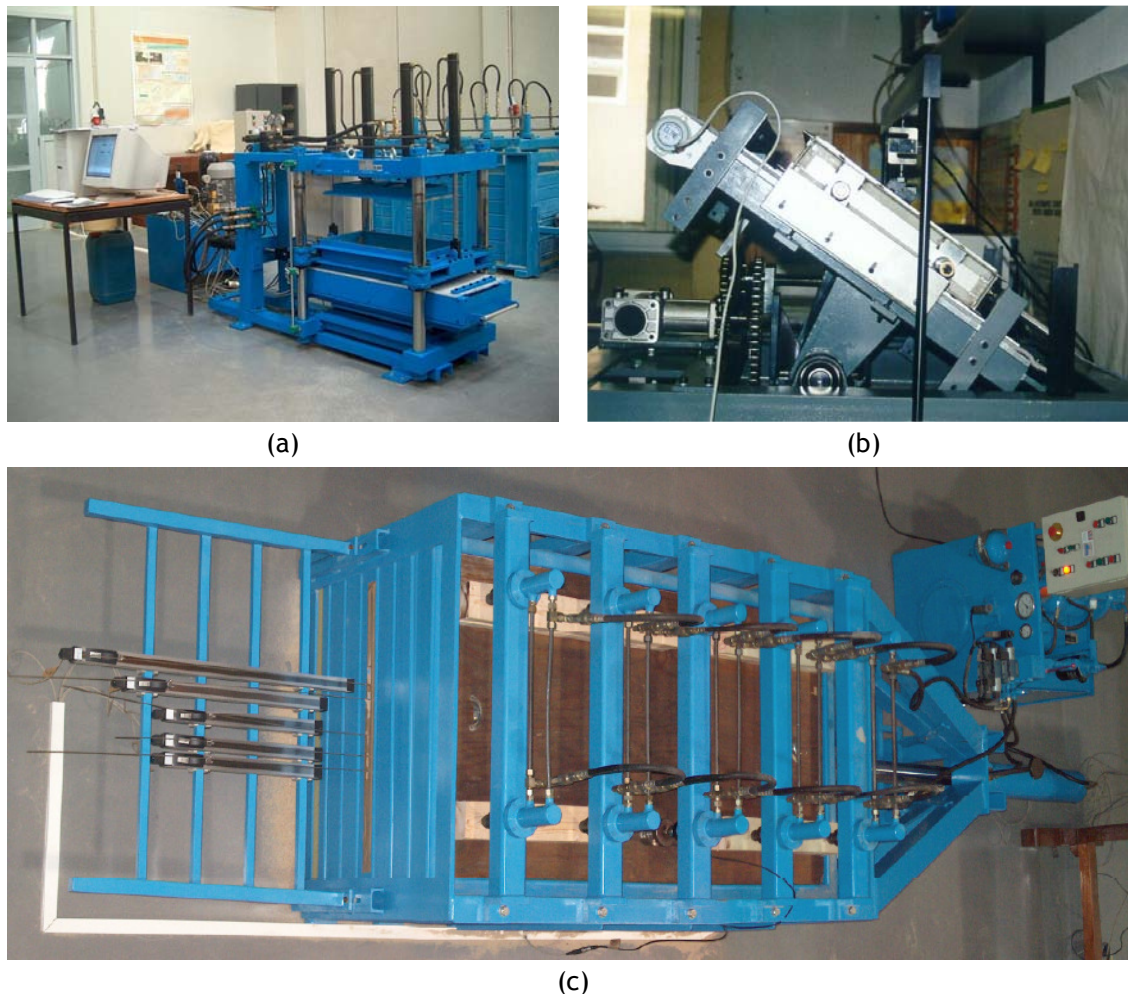


Figura 2.6 - Equipamentos do LGS para a realização dos ensaios de:  
(a) corte directo; (b) corte em plano inclinado; (c) arranque.

O método do corte em plano inclinado é importante quando os geossintéticos são instalados sobre superfícies inclinadas (como por exemplo, em taludes laterais de aterros de resíduos). A norma EN ISO 12957-2:2004 descreve um método para a realização de ensaios de corte em plano inclinado; o método de corte em plano inclinado tem vindo a ser alvo de estudos no LGS da FEUP [30-33].

A resistência ao arranque pode ser determinada através da norma EN 13738:2004. Nos últimos anos, tem vindo a ser realizados vários estudos detalhados no LGS da FEUP sobre os ensaios de arranque [3, 34-42].

#### **2.3.4 - Propriedades hidráulicas**

##### **2.3.4.1 - Permeabilidade à água normal ao plano - permissividade**

A permeabilidade à água (normal ao plano) é uma propriedade importante quando os geossintéticos desempenham funções de filtração. Nestas funções, os geossintéticos (principalmente os geotêxteis) devem permitir um fluxo de água (ou de outro fluido) perpendicular ao seu plano. A permeabilidade à água normal ao plano depende da estrutura dos geossintéticos (principalmente da distribuição e da dimensão das aberturas).

Os métodos mais comuns para determinar a permeabilidade à água normal ao plano incluem a EN ISO 11058:1999, a ASTM D4491-99a(2004)e1 e a ASTM D5493-06; o método da NP EN ISO 11058:2003 encontra-se detalhadamente descrito no ponto 4.9. A permeabilidade à água normal ao plano (em  $\text{m.s}^{-1}$ ) é muitas vezes expressa em termos de permissividade (em  $\text{s}^{-1}$ ) (obtida através da divisão do coeficiente de permeabilidade normal ao plano pela espessura do geossintético).

#### 2.3.4.2 - Permeabilidade à água no plano - transmissividade [5, 21]

A permeabilidade à água (no plano) é uma propriedade importante para funções de drenagem; esta propriedade é muitas vezes expressa em termos de transmissividade (obtida pela multiplicação do coeficiente de permeabilidade no plano pela espessura do geossintético).

A transmissividade depende da espessura ( $e$ , logo, das pressões exercidas sobre os geossintéticos) e da distribuição e dimensão das aberturas dos geossintéticos. Os geotêxteis tecidos e os não-tecidos termoligados possuem normalmente transmissividades pequenas, enquanto que as georredes e os geotêxteis não-tecidos agulhados possuem transmissividades relativamente elevadas (pelo que, são vulgarmente usados como drenos).

Os métodos existentes para a determinação da transmissividade dos geossintéticos incluem a EN ISO 12958:1999 e a ASTM D4716-08; a transmissividade é geralmente expressa em  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ . A Figura 2.7 ilustra o equipamento do LGS da FEUP para a determinação da permeabilidade à água no plano dos geossintéticos.



Figura 2.7 - Equipamento do LGS para a determinação da permeabilidade à água no plano: (a) vista geral; (b) pormenor do equipamento.

A maior parte dos geotêxteis não-tecidos possui uma transmissividade elevada, quando a pressão de confinamento é nula. No entanto, o aumento dessa pressão provoca normalmente uma redução da transmissividade dos materiais. Assim, e para avaliar este efeito, a transmissividade é vulgarmente determinada para diferentes pressões de confinamento dos geossintéticos e para vários gradientes hidráulicos.

## 2.4 - Danificação dos geossintéticos - aspectos gerais

### 2.4.1 - Considerações iniciais

A danificação dos geossintéticos pode ocorrer durante os processos de instalação (devido a vários factores: queda de objectos, de ferramentas ou de outros materiais de construção; rasgos e orifícios provocados pelo contacto com partículas angulosas; danos ocorridos durante o espalhamento e a compactação dos materiais de aterro) ou durante o tempo de vida dos materiais (abrasão, fluência, ataque químico, ataque biológico, entre outros).

Assim, para o correcto dimensionamento dos geossintéticos, é necessário identificar e ter em conta todos os agentes que possam provocar a danificação dos materiais. Os geossintéticos escolhidos para uma determinada aplicação devem possuir uma boa resistência aos vários agentes de danificação, de modo a garantir o adequado exercício das suas funções durante o tempo de vida da obra.

A danificação dos geossintéticos pode ser de origem mecânica (danificação durante os processos de instalação em obra ou por abrasão), de origem química (ataque por substâncias ácidas ou alcalinas, termo-oxidação, foto-oxidação, entre outros) ou de origem biológica (acção de microrganismos, por exemplo).

Nos pontos seguintes, procede-se a uma breve introdução aos vários tipos de danificação que podem ocorrer nos geossintéticos: danificação durante a instalação, abrasão e acção dos agentes físicos, químicos e biológicos; a resistência dos geossintéticos à danificação será discutida com mais detalhe no Capítulo 3.

Por fim, é importante referir que muitos autores classificam a danificação durante a instalação, a abrasão e a resistência aos agentes de degradação físicos, químicos e biológicos como propriedades relativas à durabilidade (e daí, a inclusão de uma breve referência a este assunto neste capítulo).

### 2.4.2 - Danificação durante a instalação [21]

A instalação em obra pode provocar vários danos nos geossintéticos (orifícios, rasgos, entre outros); esses danos ocorrem essencialmente durante a colocação dos geossintéticos e durante as operações de espalhamento e compactação dos materiais de aterro. Nalgumas situações, as tensões causadas pelas operações de instalação podem ser mais severas do que aquelas a que os geossintéticos irão estar sujeitos durante a fase de operação [4].

A danificação que os geossintéticos sofrem durante a instalação pode ser avaliada *in situ* (através da construção de aterros experimentais) ou através de simulações laboratoriais. A norma EN ISO 10722: 2007 descreve um método laboratorial para avaliar os danos sofridos pelos geossintéticos durante a instalação em obra. Nos últimos anos, foram realizados vários estudos detalhados no LGS da FEUP sobre a danificação sofrida pelos geossintéticos durante a instalação [3, 43-47].

A Figura 2.8 ilustra o equipamento disponível no LGS da FEUP para simular os danos sofridos pelos geossintéticos durante a instalação (ensaios de acordo com a EN ISO 10722:2007).



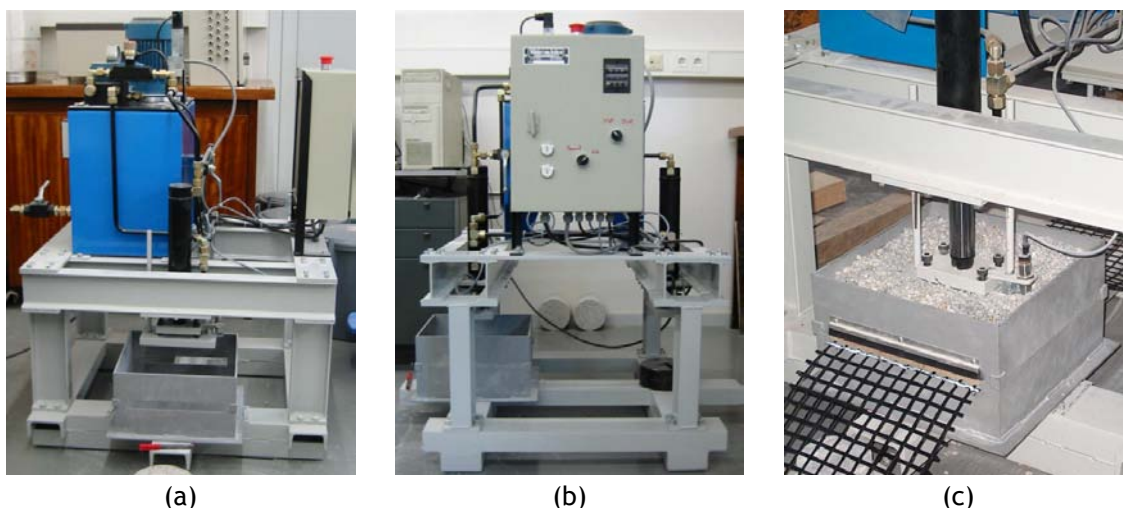


Figura 2.8 - Equipamento do LGS para a realização de ensaios de danificação durante a instalação: (a) vista de frente; (b) vista lateral; (c) equipamento durante o ensaio de um geossintético.

### 2.4.3 - Abrasão

A abrasão é o desgaste sofrido pelos geossintéticos por contacto (fricção) com outra superfície ou com outros materiais de construção (nomeadamente agregados sujeitos a cargas cíclicas de pequena amplitude). A ocorrência de abrasão é relativamente comum em aplicações ferroviárias, onde os geossintéticos são desgastados pelas partículas de balastro com as quais contacta.

Os métodos normalmente usados para avaliar a resistência dos geossintéticos à abrasão incluem a EN ISO 13427:1998 e a ASTM D4886-88(2002). No LGS da FEUP foram realizados alguns estudos sobre a resistência dos geossintéticos à abrasão [48, 49]; a Figura 2.9 ilustra o equipamento utilizado nesses estudos.

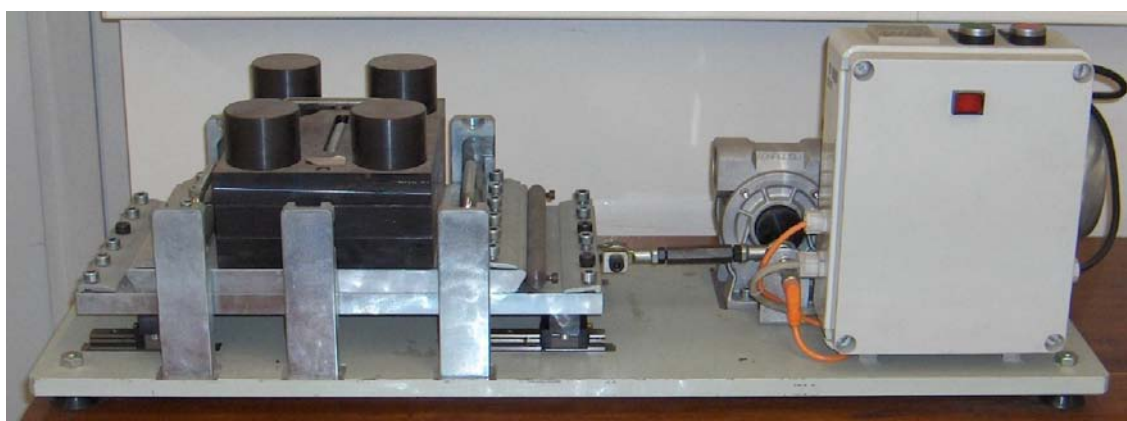


Figura 2.9 - Equipamento do LGS para simular os danos provocados pela abrasão.

### 2.4.4 - Agentes de degradação físicos, químicos e biológicos

Durante o seu tempo de serviço, os geossintéticos podem estar sujeitos à acção de vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos. Uma exposição prolongada a estes agentes de degradação pode ter um impacto negativo nas propriedades dos geossintéticos (e, eventualmente, provocar uma redução significativa do tempo de vida útil dos materiais).

Os mecanismos de degradação mais comuns dos geossintéticos incluem: acção da radiação solar e de outros agentes climatéricos, acção da temperatura, oxidação (causada pela temperatura e radiação UV), acção de líquidos (absorção, extracção de componentes, reacções químicas com os polímeros) e acção de microrganismos.

Os principais mecanismos de degradação dos geossintéticos serão discutidos com detalhe no Capítulo 3. Nesse capítulo, serão também apresentados os métodos existentes para avaliar a resistência dos materiais aos vários agentes de degradação.

## **2.5 - Considerações finais**

Neste capítulo, procedeu-se à apresentação das principais normas desenvolvidas pelas comissões de normalização da área dos geossintéticos (CEN TC 189, ISO TC 221 e ASTM D35). Muitas vezes, quando não existem normas específicas para os geossintéticos, são adoptados os métodos desenvolvidos por outras comissões técnicas de normalização, como o CEN TC 248 (Têxteis e produtos têxteis), a ISO TC 38 (Têxteis), a ISO TC 61 (Plásticos), a ASTM D13 (Têxteis), a ASTM D20 (Plásticos) ou a ASTM G03 (Envelhecimento climatérico e durabilidade).

Procedeu-se, também, à descrição das principais propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos; para cada propriedade, foram indicados os métodos geralmente utilizados para a sua determinação. Por fim, foram apresentados os principais agentes de degradação dos geossintéticos; a durabilidade dos geossintéticos será discutida com maior pormenor no Capítulo 3.

# CAPÍTULO 3

## Durabilidade dos geossintéticos

### 3.1 - Introdução

A durabilidade dos geossintéticos pode ser definida como a capacidade que os materiais possuem de manter determinadas propriedades ao longo do tempo. Para tentar assegurar que os geossintéticos funcionam durante todo o tempo de vida de uma obra, é necessário identificar os principais agentes de degradação (presentes nessa obra) e avaliar qual a resistência dos materiais a esses agentes. A garantia da durabilidade é um requisito fundamental para a aplicação dos geossintéticos.

O tempo de vida esperado para os geossintéticos aplicados em obras de Engenharia Civil pode variar deste um ano até mais de uma centena de anos. Durante esse período de tempo, os geossintéticos devem desempenhar correctamente as funções para as quais foram instalados. Para tal, é essencial que os materiais possuam uma boa resistência aos vários agentes de degradação.

Neste capítulo, procede-se à descrição dos principais mecanismos de degradação dos geossintéticos, à apresentação dos principais tipos de aditivos químicos (e modo de funcionamento) que podem ser usados para inibir ou retardar a degradação dos geossintéticos e à discussão dos métodos existentes para avaliar a resistência dos materiais aos vários agentes de degradação. Serão, também, indicados os principais estudos (existentes na literatura) sobre a durabilidade dos geossintéticos.

Na parte final do capítulo, procede-se a uma breve descrição dos fundamentos teóricos de algumas técnicas analíticas (técnicas usadas durante a execução experimental deste trabalho para avaliar a degradação sofrida pelos geossintéticos durante os ensaios de durabilidade).

### 3.2 - Agentes e mecanismos de degradação dos geossintéticos

#### 3.2.1 - Considerações iniciais

Nas suas mais variadas aplicações, os geossintéticos podem estar expostos à acção de vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos; o contacto prolongado com estes agentes pode afectar negativamente a durabilidade dos materiais.

Os principais agentes de degradação dos geossintéticos incluem: as espécies químicas (como ácidos ou bases), as temperaturas elevadas, o oxigénio atmosférico, a radiação solar (principalmente a UV) e outros agentes climáticos, a humidade e os microrganismos. Nos pontos seguintes, procede-se à descrição dos principais agentes e mecanismos de degradação dos geossintéticos.

### 3.2.2 - Acção dos líquidos [4, 5, 11, 50]

#### 3.2.2.1 - Absorção de líquidos

A existência de uma interacção elevada entre os líquidos e os polímeros favorece a penetração das moléculas de líquido nos materiais poliméricos. Estas moléculas podem quebrar as ligações entre as cadeias poliméricas, aumentando a distância entre essas cadeias e reduzindo a sua coesão (o que aumenta a sua mobilidade); este efeito causa vulgarmente um aumento das dimensões dos materiais poliméricos (intumescimento) e uma perda de rigidez.

Desde que não ocorram alterações morfológicas e químicas muito significativas, os danos causados pela absorção de líquidos podem ser reversíveis (através da remoção dos líquidos). Em muitos casos, a absorção de líquidos pode originar alterações irreversíveis na estrutura dos materiais poliméricos (por exemplo, pela ocorrência de reacções de hidrólise).

As fases amorfas são mais vulneráveis à penetração de líquidos do que as fases cristalinas, que são normalmente consideradas impermeáveis a líquidos. Para os polímeros semi-cristalinos, como o PE ou o PP, o intumescimento da fase amorfa pode provocar o aparecimento de *stress* mecânico entre as fases amorfas e cristalinas, podendo originar quebras na cadeia polimérica.

#### 3.2.2.2 - Extracção de aditivos

O contacto prolongado com líquidos pode causar a extracção total ou parcial dos aditivos existentes nos geossintéticos. Os aditivos podem ser removidos da superfície dos geossintéticos por lixiviação (pela acção da água ou de qualquer outro líquido em contacto com os materiais); alguns aditivos (os mais voláteis) podem ser removidos da superfície dos geossintéticos por volatilização (Figura 3.1).

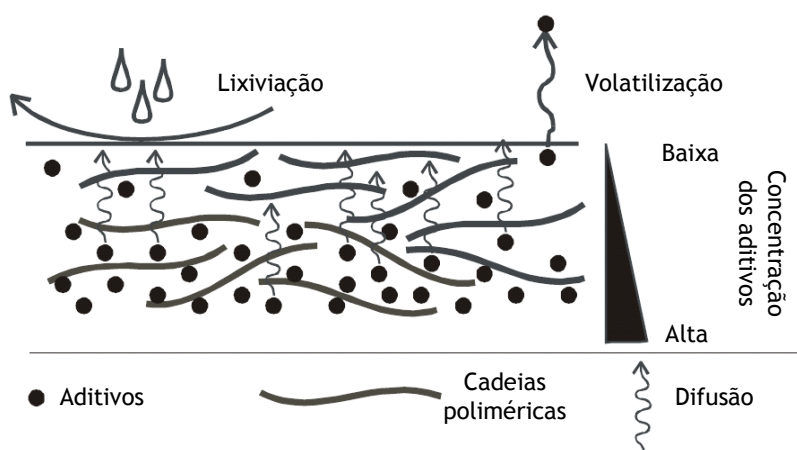


Figura 3.1 - Extracção dos aditivos por lixiviação e por volatilização (adaptado de [50]).

A extracção dos aditivos à superfície dos geossintéticos ocorre quando o nível de interacção entre os aditivos e o solvente extractor (água ou outra substância química) for maior que a interacção entre os aditivos e o polímero. A extracção subsequente requer a difusão dos aditivos do cerne polimérico para a superfície.

A velocidade de difusão de um aditivo num determinado sistema polimérico depende dos seguintes parâmetros: (1) tamanho do aditivo; (2) grau de interacção entre o aditivo e as cadeias poliméricas, comparado com o grau de interacção entre o aditivo e o meio ambiente circundante; (3) morfologia do polímero e mobilidade das cadeias poliméricas.

Quando a velocidade de difusão (do cerne para a superfície) for lenta comparada com a velocidade de extracção e/ou consumo à superfície, ocorre a formação de um gradiente de concentração do aditivo no material (a concentração à superfície é menor que a concentração no cerne). No caso do aditivo estar envolvido num processo de estabilização, o nível de protecção à superfície é menor, o que pode causar o aparecimento de danos locais (fissuras, alterações de cor) no material polimérico (mesmo que a concentração de aditivo permaneça elevada no cerne do material).

Alguns exemplos da extracção de aditivos incluem as perdas de plastificantes em geomembranas de PVC flexíveis e as perdas de antioxidantes em geomembranas de PEAD.

### **3.2.2.3 - Reacções químicas com líquidos**

Em determinadas situações, os líquidos podem reagir com as cadeias poliméricas dos geossintéticos, alterando a estrutura dos materiais. As reacções químicas dos polímeros seguem as regras gerais da Química Orgânica; a reactividade dos polímeros (com uma dada espécie química) está directamente relacionada com os grupos moleculares presentes na sua estrutura.

Para além das reacções com as cadeias poliméricas, os líquidos podem também neutralizar alguns estabilizantes (reagindo com eles) ou reagir com pigmentos (modificando a aparência dos artefactos poliméricos).

O ataque por líquidos não é normalmente um problema para os geossintéticos em contacto com solo natural ou com agregados, dado que estes tendem a ser quimicamente não agressivos. No entanto, podem surgir problemas com o contacto com lixiviados quimicamente agressivos resultantes de lixos industriais. No caso das geomembranas, usadas como barreira de fluidos e em contacto permanente com os lixiviados, a resistência aos líquidos é de grande importância.

De um modo geral, e à temperatura ambiente, os polímeros normalmente usados para o fabrico dos geossintéticos possuem uma resistência bastante boa à acção dos líquidos: as poliolefinas têm uma resistência elevada aos ácidos, às bases e à maioria dos solventes; o PET é relativamente sensível à hidrólise; as poliamidas são afectadas pelos ácidos.

A hidrólise (descrita em seguida) é um processo de degradação típico envolvendo reacções entre a água e alguns polímeros, como os poliésteres ou as poliamidas.

### **3.2.2.4 - Hidrólise**

A hidrólise é a reacção química entre as moléculas de água e os polímeros; origina roturas na cadeia polimérica (diminuição da massa molecular), o que provoca um impacto negativo nas propriedades mecânicas dos geossintéticos (os materiais ficam mais frágeis e quebradiços).

A velocidade de hidrólise é normalmente dependente da temperatura, da humidade e do pH (de um modo geral, a hidrólise ocorre mais rapidamente em meios ácidos e alcalinos). A hidrólise é também influenciada pela estrutura molecular dos polímeros (grupos característicos, grau de cristalinidade, entre outros).

Dependendo do nível de humidade, a presença de vapor de água pode causar os mesmos efeitos que a água líquida. A humidade pode, ainda, ter um efeito sinérgico com outros agentes de degradação.

Nos geossintéticos mais comuns, a hidrólise pode ocorrer essencialmente nos materiais fabricados a partir de poliésteres e a partir de poliamidas. De um modo geral, a hidrólise é relativamente lenta à temperatura ambiente (podendo ser acelerada pelo aumento da temperatura).

Os poliésteres são normalmente mais afectados em meios alcalinos do que em meios ácidos (assim, não devem ser utilizados materiais de poliésteres num solo com pH elevado). Pelo contrário, os pHs baixos são mais danosos para algumas poliamidas. A Figura 3.2 esquematiza a reacção de hidrólise do PET.

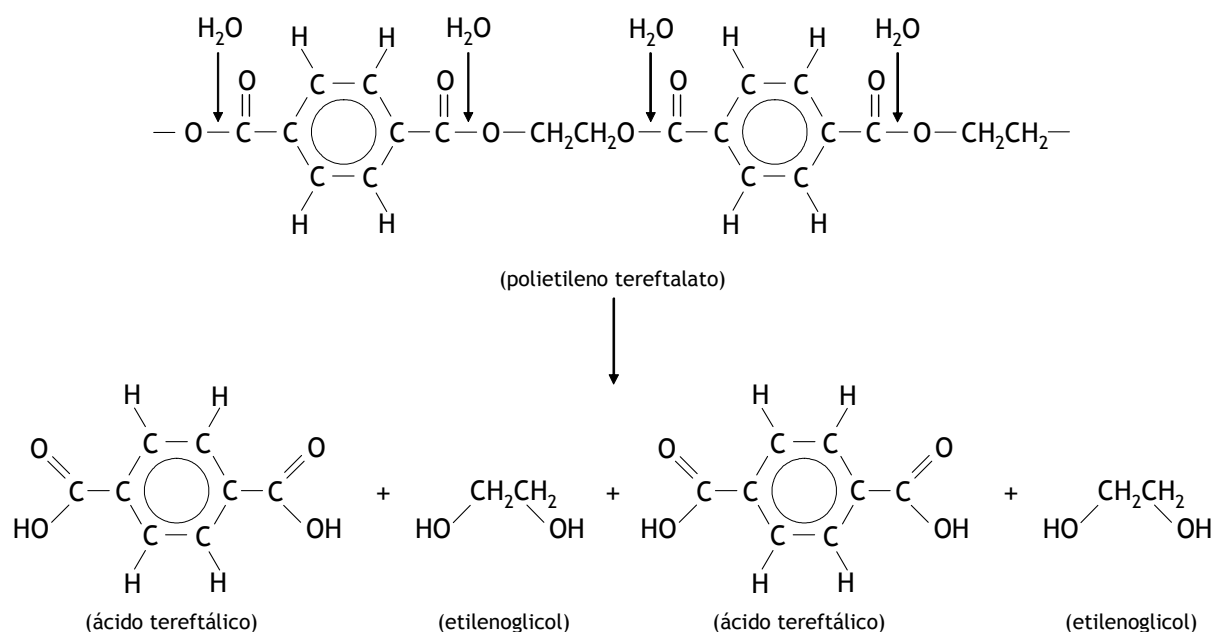


Figura 3.2 - Reacção de despolimerização do polietileno tereftalato por hidrólise.

### 3.2.3 - Acção da temperatura [4, 50]

A acção da temperatura (calor) pode provocar danos nos geossintéticos de vários modos: acelerando os mecanismos de degradação dos polímeros, causando a dissociação das ligações químicas ao longo da cadeia polimérica, promovendo a formação de radicais livres (que, em contacto com o oxigénio, iniciam a oxidação dos polímeros) ou originando a dilatação ou contracção térmica dos materiais.

A velocidade das reacções químicas é principalmente controlada pela temperatura; um aumento da temperatura provoca normalmente o aumento da velocidade das reacções (em muitas reacções, um aumento de 10 °C na temperatura resulta numa duplicação da velocidade da reacção) e favorece a difusão de espécies químicas nos polímeros.

Assim, os mecanismos de degradação dos geossintéticos são normalmente acelerados pelo aumento da temperatura. Por este motivo, o aumento da temperatura é usado como factor de aceleração em muitos métodos laboratoriais de avaliação da resistência dos geossintéticos à degradação química (acção dos líquidos, oxidação, acção da radiação UV, entre outros).

A energia térmica pode provocar a ruptura de ligações químicas (desde que a energia fornecida seja igual ou superior à energia das ligações). A dissociação de ligações químicas pode originar rupturas na cadeia polimérica ou pode resultar na eliminação de moléculas (como por exemplo, a eliminação de moléculas de ácido clorídrico no caso do PVC).

A dissociação de ligações químicas por acção do calor pode também originar a formação de radicais livres; na presença de oxigénio, estes radicais podem atacar as moléculas de polímero vizinhas (num processo chamado de termo-oxidação - descrição no ponto 3.2.4) e, assim, propagar a degradação.

O aumento da temperatura pode causar a expansão térmica dos geossintéticos; dado que a maioria dos geossintéticos são termoplásticos, o efeito da expansão térmica é reversível. Por sua vez, uma diminuição da temperatura pode provocar uma contracção térmica dos materiais.

Nos geossintéticos em forma de folha (como as geomembranas), a contracção ou a dilatação térmica tipicamente originam alterações nas dimensões globais dos materiais, criando rugas com o aumento da temperatura ou criando *stress* mecânico com a diminuição da temperatura (a deformação que os materiais podem sofrer está normalmente limitada pela estrutura envolvente).

A acção da temperatura não é normalmente um problema nas aplicações típicas dos geossintéticos; de um modo geral, as temperaturas a que os materiais estão expostos não são suficientemente altas para causarem danos significativos. No entanto, as elevadas temperaturas de processamento podem provocar alguma degradação térmica durante o processo de fabrico dos geossintéticos.

A degradação térmica que pode (ou não) ocorrer durante o processo de fabrico pode ter uma grande influência na durabilidade dos geossintéticos; as irregularidades estruturais devido à ocorrência de degradação térmica durante o processo de fabrico podem tornar os geossintéticos mais vulneráveis a futuros mecanismos de degradação. Para evitar ou, pelo menos, minimizar este problema, podem ser adicionados estabilizantes térmicos aos polímeros.

### **3.2.4 - Oxidação [13-15, 50-53]**

#### **3.2.4.1 - Aspectos gerais**

O oxigénio é uma das principais causas de degradação de muitos materiais poliméricos, incluindo os geossintéticos; o processo de oxidação pode originar uma falha prematura dos materiais. Os efeitos da oxidação incluem normalmente alterações físicas (como a perda de brilho e de transparência, o amarelecimento e o aparecimento de fissuras) e mecânicas (como a diminuição da flexibilidade, da resistência à tracção, da resistência ao impacto ou da elongação) nos materiais poliméricos.

A oxidação pode originar roturas nas cadeias poliméricas, provocando uma diminuição da resistência mecânica dos geossintéticos e tornando-os frágeis e quebradiços. A oxidação pode, também, causar a formação de novas ligações entre as cadeias; este processo provoca uma diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas e altera o comportamento mecânico dos geossintéticos (os materiais ficam normalmente mais rígidos e quebradiços) (Figura 3.3).

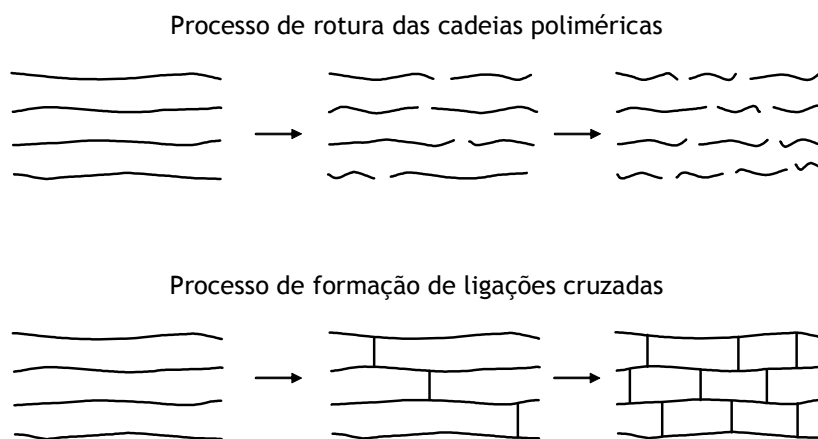


Figura 3.3 - Degradação dos polímeros por oxidação (adaptado de [50]).

O processo de oxidação começa normalmente de forma lenta, mas depois acelera rapidamente até à falha catastrófica do artefacto polimérico. No período inicial do processo de oxidação (denominado de período de indução) não ocorrem variações significativas nas propriedades dos geossintéticos. Em seguida, e à medida que o processo de oxidação avança, é atingido um período de aceleração onde a oxidação das cadeias poliméricas dos geossintéticos ocorre rapidamente (Figura 3.4).

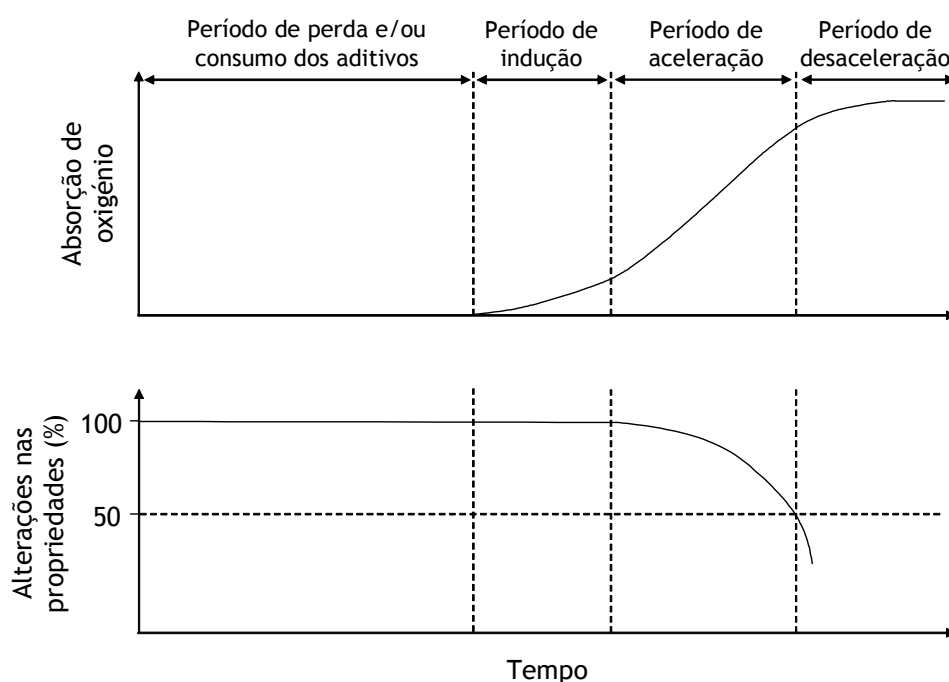


Figura 3.4 - Estados de oxidação do PEAD estabilizado (adaptado de [50]).



O processo de oxidação dos geossintéticos pode ser acelerado por muitos factores, tais como: a luz solar (devido à radiação UV), o aumento da temperatura, a presença de catiões metálicos (como o ferro ou o cobre), a humidade, o *stress* mecânico, entre outros.

#### 3.2.4.2 - *Mecanismos de oxidação*

A oxidação é um fenómeno bastante complexo que ocorre por um mecanismo de reacção em cadeia, constituído por três passos fundamentais: iniciação, propagação e terminação. O passo de iniciação é causado tipicamente por factores como a temperatura (termo-oxidação) ou como a radiação UV (foto-oxidação) e consiste na formação de um radical livre ( $R\bullet$ ) (Reacção 3.1); a contaminação com resíduos metálicos ou o *stress* mecânico também podem provocar a formação de radicais livres.



O oxigénio atmosférico reage prontamente com o radical livre formado ( $R\bullet$ ), originando um radical peróxido muito reactivo ( $ROO\bullet$ ) (Reacção 3.2).



O radical peróxido ( $ROO\bullet$ ) formado vai extrair um átomo de hidrogénio ao polímero circundante (RH), dando origem a um hidroperóxido ( $ROOH$ ) e a outro radical livre ( $R\bullet$ ) (Reacção 3.3).



O radical livre  $R\bullet$  reage novamente de acordo com a Reacção 3.2, aumentando o grau de degradação. O hidroperóxido  $ROOH$  é muito instável, podendo ser facilmente convertido nos radicais  $RO\bullet$ ,  $ROO\bullet$  e  $\bullet OH$  (Reacções 3.4 e 3.5).



Os radicais livres formados ( $RO\bullet$ ,  $ROO\bullet$  e  $\bullet OH$ ) podem extrair átomos de hidrogénio das cadeias poliméricas vizinhas e aumentar assim a extensão da degradação.

Este mecanismo de reacção em cadeia (autocatalítico) irá continuar até que todos os radicais livres formados sejam transformados em compostos não reactivos (por exemplo, pela acção de compostos antioxidantes). Assim, mesmo pequenas quantidades de radicais livres podem provocar uma extensa degradação nos geossintéticos.

A reacção em cadeia pode terminar através do acoplamento das principais espécies de propagação (Reacções 3.6, 3.7 e 3.8).



O processo de oxidação pode ser retardado ou inibido pela incorporação de pequenas quantidades (em geral, 0,02% a 1%) de antioxidantes e estabilizantes na composição dos geossintéticos.

### 3.2.4.3- Mecanismo de oxidação: caso particular do polietileno e do polipropileno

O processo de oxidação do PE e do PP ocorre de acordo com o mecanismo geral descrito na secção anterior. No entanto, e dado que o PP foi o polímero usado para o fabrico dos geotêxteis estudados neste trabalho, o mecanismo de oxidação específico do PP encontra-se ilustrado na Figura 3.5.

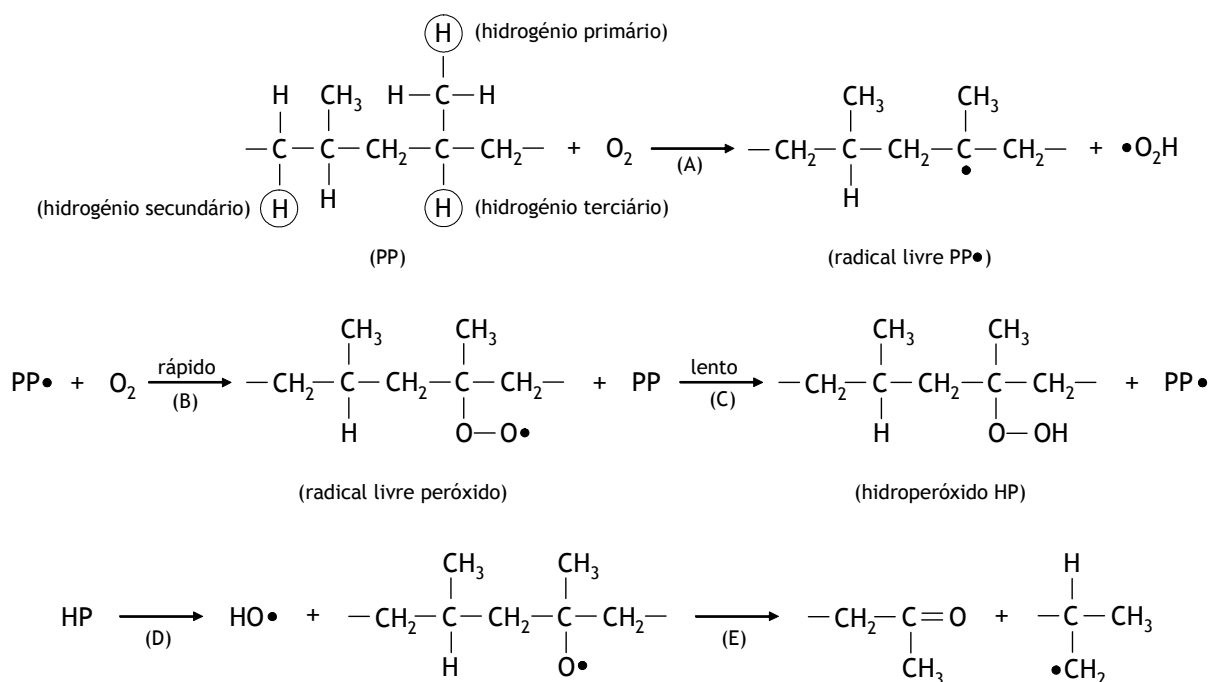


Figura 3.5 - Mecanismo de oxidação do polipropileno (adaptado de [51]).

O PP sofre mais facilmente oxidação do que o PE, devido a possuir um átomo de hidrogénio terciário no átomo de carbono (terciário) ligado ao grupo metilo pendente; o PE não possui nenhum átomo de hidrogénio terciário, apenas átomos de hidrogénio secundários.

O radical livre PP• formado pela extracção do átomo de hidrogénio terciário do PP é mais estável do que o radical livre PE• formado pela extracção de um átomo de hidrogénio secundário do PE (devido à maior tendência dos átomos de carbono ao longo da cadeia doarem electrões ao radical deficiente em electrões). Assim, a maior probabilidade da reacção com átomos de hidrogénio terciários para a formação de radicais livres aumenta consideravelmente a susceptibilidade do PP sofrer oxidação.

A oxidação do PP origina normalmente a rotura das cadeias poliméricas (reacção E da Figura 3.5); a formação de ligações cruzadas (comum no PE) não ocorre frequentemente no PP, devido ao ataque preferencial ao átomo de hidrogénio terciário (o que conduz à rotura das cadeias poliméricas). As reacções de oxidação do PP podem originar vários compostos, como ácidos carboxílicos, aldeídos ou ésteres (provocando normalmente o amarelecimento dos artefactos poliméricos).

O processo de oxidação do PE e do PP é normalmente acelerado pela presença de cátions metálicos, como o cátion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), o cátion cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ou o cátion manganésio ( $\text{Mn}^{2+}$ ) [11, 54].

### 3.2.5 - Acção dos agentes climatéricos

#### 3.2.5.1 - Considerações iniciais

Os geossintéticos expostos ao ar livre são tipicamente degradados pela luz solar (em particular pela radiação UV) em combinação com o oxigénio atmosférico, temperatura (valores extremos, altos ou baixos, ou pelas variações de temperatura) e humidade. Existem ainda outros agentes que podem induzir danos nos geossintéticos (tais como, poluentes atmosféricos, microrganismos, ozono, *stress* mecânico, entre outros). A degradação normalmente inicia-se na superfície exterior dos materiais, evoluindo progressivamente em direcção ao cerne da estrutura polimérica.

Em seguida, procede-se a uma breve descrição dos principais agentes capazes de provocar danos nos geossintéticos expostos ao ar livre.

#### 3.2.5.2 - Radiação solar [4, 15, 55]

A radiação solar que atinge a superfície da Terra possui comprimentos de onda compreendidos entre os 295 e os 3000 nm; o espectro da radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ser dividido em três regiões: radiação UV (entre 295 e 400 nm), radiação visível (entre 400 e 780 nm) e radiação infravermelha (entre 780 e 3000 nm) (Figura 3.6).

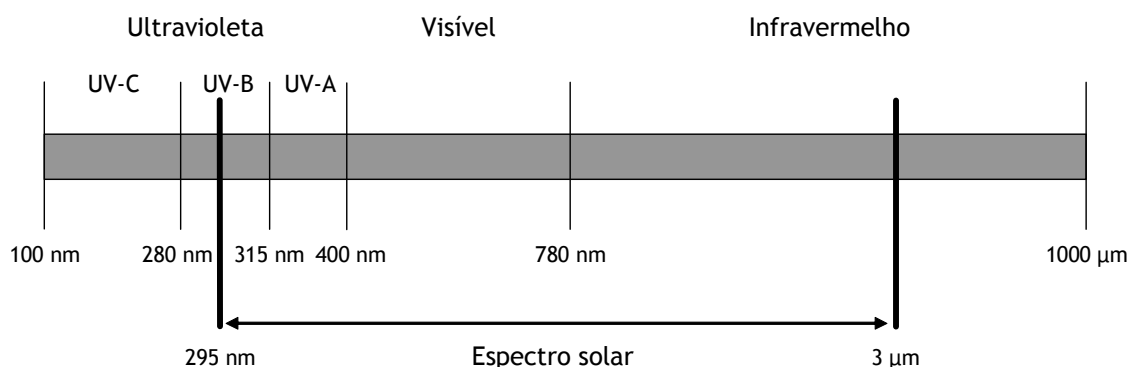


Figura 3.6 - Espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra.

A região UV representa apenas cerca de 4% do espectro solar que atinge a superfície terrestre, mas é a zona mais energética (a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda) e aquela que pode provocar mais danos aos materiais poliméricos. A região UV pode ser subdividida em três zonas: UV-A (entre 315 e 400 nm), que provoca alguma degradação nos polímeros; UV-B (entre 280 e 315 nm), que causa sérios danos nos polímeros; UV-C (entre 100 e 280 nm), apenas encontrada fora da atmosfera terrestre.

A degradação dos polímeros ocorre quando os fotões existentes na radiação solar interagem com as suas cadeias poliméricas (os fotões com energia igual ou superior à energia das ligações existentes

nesses polímeros podem causar a rotura das cadeias poliméricas). No entanto, apenas os fótons com comprimentos de onda na região UV da radiação solar são suficientemente energéticos para quebrar algumas ligações químicas existentes nos polímeros. De facto, a energia de muitas ligações químicas é idêntica à energia fornecida pela radiação UV.

A energia fornecida pela radiação UV pode causar a formação de radicais livres que, em combinação com o oxigénio atmosférico, provocam a foto-oxidação dos polímeros. O processo de foto-oxidação é idêntico ao processo de termo-oxidação, com a excepção da energia que promove a formação dos radicais livres ser fornecida pela radiação UV (e não pela temperatura) (o processo de oxidação foi detalhadamente descrito no ponto 3.2.4).

A radiação UV que atinge a superfície terrestre depende da localização geográfica, da época do ano e das condições meteorológicas; o espectro solar no Inverno não é igual ao espectro solar no Verão (Figura 3.7). No Inverno, a radiação UV-B (muito energética, a mais danosa) não atinge a superfície terrestre; além disso, a irradiância solar é menor no Inverno (por estes motivos, a degradação solar é menor nesta época do ano).

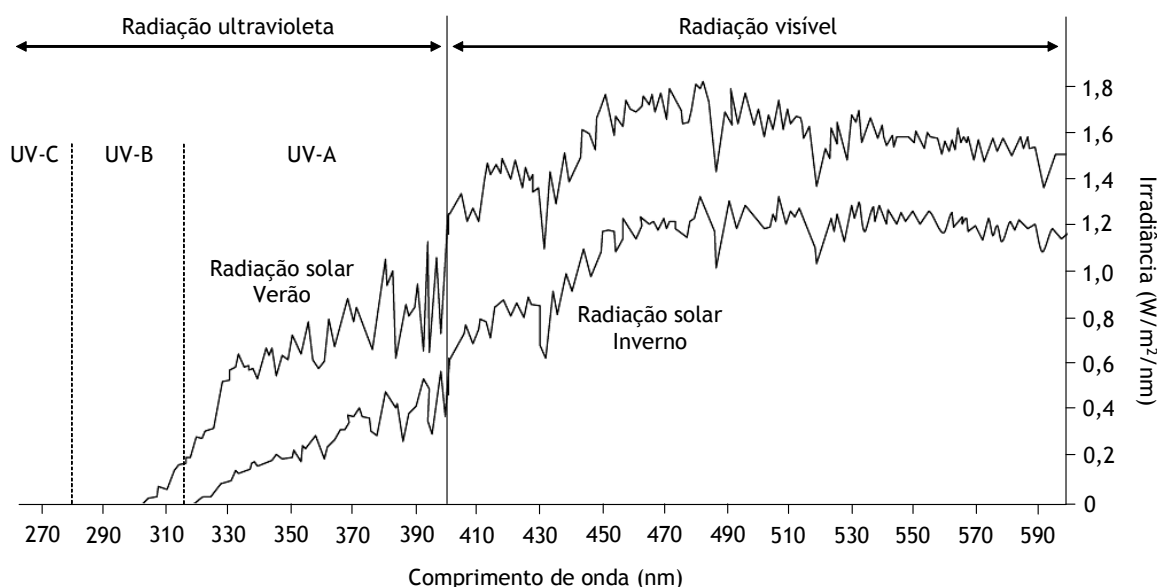


Figura 3.7 - Espectros da radiação solar no Inverno e no Verão (adaptado de [4]).

A degradação provocada pela radiação UV pode ser afectada pela temperatura, pela humidade, pela precipitação, pelo oxigénio atmosférico, pelo vento, pela poluição atmosférica, entre outros.

A exposição prolongada à radiação UV provoca: descoloração, aparecimento de fissuras, fragilização e modificações nas propriedades mecânicas (diminuição da resistência à tracção e da resistência ao impacto) dos materiais poliméricos.

A maneira mais simples de proteger os geossintéticos da acção nociva da radiação UV é evitar expor os materiais ao sol. No entanto, a eliminação de toda a exposição à radiação solar é, na maioria dos casos, impossível. Nalgumas aplicações, os geossintéticos podem mesmo estar expostos durante um longo período de tempo. A degradação causada pela radiação UV é normalmente retardada através

da incorporação de aditivos químicos (antioxidantes, estabilizantes UV ou pigmentos) na composição dos materiais; a descrição do modo de operação destes aditivos pode ser encontrada no ponto 3.3.

#### **3.2.5.3 - Temperatura** [56-58]

A temperatura dos materiais expostos à radiação solar é normalmente maior do que a temperatura atmosférica; a temperatura dos materiais é influenciada pela temperatura atmosférica, pelo vento, pela evaporação de água à sua superfície e pela sua própria cor.

Quando expostos à radiação solar, os materiais poliméricos de diferentes cores adquirem diferentes temperaturas; a capacidade de absorção de radiação infravermelha depende da cor dos materiais. Nas mesmas condições de exposição, a temperatura de um material preto é superior à temperatura de um material branco. Assim, os materiais de diferentes cores terão comportamentos distintos nas exposições ao ar livre, não só por possuírem diferentes pigmentos de cor, mas também porque os processos foto-oxidativos não irão ocorrer à mesma temperatura.

A temperatura dos materiais varia do dia para a noite. O abaixamento nocturno da temperatura do ar pode provocar a condensação de água à superfície dos materiais; a condensação de água ocorre quando a temperatura dos materiais é menor que a temperatura de condensação da água existente no ar. A chuva pode causar um choque térmico nos materiais (diminuição brusca da temperatura). A ocorrência de ciclos de gelo-degelo pode provocar *stress* mecânico nos materiais.

A temperatura atmosférica (e a temperatura dos materiais) pode afectar a velocidade das reacções químicas de degradação e a velocidade da difusão de aditivos e componentes externos (poluentes atmosféricos, contaminantes). A variação diária de temperatura pode provocar ciclos de contracção e expansão nos materiais (originando *stress* mecânico e acelerando o aparecimento de fissuras); os movimentos dos materiais podem ser futuramente acelerados pela absorção e desorção de água.

#### **3.2.5.4 - Oxigénio atmosférico**

O oxigénio atmosférico, em combinação com a radiação UV ou com a temperatura, pode provocar a oxidação dos polímeros. O processo de foto-oxidação é o principal responsável pela falha prematura de muitos materiais poliméricos usados em aplicações ao ar livre (descrição do processo de oxidação no ponto 3.2.4).

#### **3.2.5.5 - Humidade** [56-58]

A existência de um elevado teor de humidade pode acelerar o processo de degradação dos materiais poliméricos expostos ao ar livre. A água pode provir da chuva, do orvalho, da neve ou do granizo; a duração do período de molhado é muito dependente do ângulo de exposição dos materiais.

A água pode promover a ocorrência de reacções de hidrólise, pode ser absorvida e pode remover os aditivos mais solúveis dos materiais poliméricos. A absorção de água provoca a expansão do volume dos materiais, causando *stress* mecânico (além disso, permite a ocorrência de reacções de hidrólise no interior dos materiais).

A chuva permite a lavagem dos materiais (pode provocar choques térmicos) e a deposição de gases dissolvidos como o dióxido de carbono, oxigénio ou poluentes atmosféricos. A condensação de água à superfície dos materiais (orvalho) ocorre essencialmente durante a noite; o orvalho permanece em contacto com os materiais durante várias horas (promovendo a degradação).

A duração do período em que os materiais estão molhados (devido à queda de chuva ou à formação de orvalho) é mais importante do que a quantidade total de precipitação; é durante este período de molhado que podem ocorrer vários processos degenerativos que contribuem para a degradação dos materiais poliméricos.

#### **3.2.5.6 - Outros agentes de degradação ao ar livre** [56-58]

Para além da radiação UV, da temperatura, do oxigénio e da humidade, existem outros agentes que podem afectar a degradação dos materiais poliméricos expostos ao ar livre. Dentro desses agentes, incluem-se os poluentes atmosféricos, o ozono, os microrganismos e a presença de *stress* mecânico.

Os poluentes atmosféricos mais comuns incluem óxidos de carbono (CO e CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e alguns hidrocarbonetos; alguns poluentes podem acelerar o processo de oxidação dos materiais poliméricos.

A camada de ozono protege a superfície terrestre da radiação UV-B e UV-C (absorve toda a radiação UV com comprimento de onda inferior a 295 nm). No entanto, o ozono é um poderoso oxidante que pode reagir com alguns polímeros. A ozonólise pode provocar danos nos materiais poliméricos, como por exemplo, o aparecimento de fissuras ou a deterioração das propriedades mecânicas.

A humidade, em combinação com a temperatura, pode promover o crescimento de microrganismos (como bactérias, fungos ou algas) nos materiais expostos ao ar livre. No entanto, no caso particular dos geossintéticos, os danos causados por estes organismos são normalmente insignificantes.

A presença de *stress* mecânico pode acelerar a degradação dos materiais poliméricos expostos ao ar livre. As fontes de *stress* mecânico mais comuns incluem as variações de temperatura (que causam a expansão e a contracção de muitos materiais) e a absorção de água. Dependendo da estrutura e da forma de muitos materiais, a acção do vento também pode ser uma fonte de *stress* mecânico.

#### **3.2.6 - Acção dos microrganismos** [11, 50]

A degradação dos polímeros por alguns tipos específicos de microrganismos envolve a metabolização de segmentos da cadeia polimérica, normalmente envolvendo hidrólise ou mecanismos de oxidação enzimáticos. A degradação microbiológica pode também resultar da acção de substâncias químicas produzidas pelo metabolismo dos microrganismos. Os microrganismos mais relevantes na degradação dos geossintéticos incluem as bactérias, os fungos e as algas.

Os principais factores que influenciam a actividade microbiológica são a temperatura, a humidade, a radiação UV e a luz visível. A degradação microbiológica é favorecida em ambientes húmidos com

temperatura estável em torno os 30 °C. A luz visível pode favorecer o crescimento de alguns tipos de microrganismos, mas a maioria deles são destruídos pela radiação UV.

A degradação microbiológica tem uma influência muito reduzida para a maioria das aplicações dos geossintéticos e tipicamente não é um problema para as formulações dos plásticos modernos. Este tipo de degradação pode ser um problema em algumas aplicações em ambientes tropicais com solos orgânicos com bom fornecimento de água.

A acção dos microrganismos pode provocar a rotura de cadeias poliméricas e a diminuição da massa molecular dos polímeros; os polímeros biodegradados ficam mais frágeis e quebradiços. A acção dos microrganismos pode ser combatida através de adição de biocidas aos polímeros.

Os microrganismos podem também atacar alguns tipos de aditivos e, assim, alterar as propriedades dos geossintéticos. Os antioxidantes e os estabilizantes UV são normalmente estáveis; alguns tipos de plastificantes (usados, por exemplo, em geomembranas de PVC) podem ser mais vulneráveis.

Por fim, e mesmo sem provocar danos poliméricos nos geossintéticos, a acção dos microrganismos pode reduzir drasticamente o tempo de vida de um sistema de drenagem. De facto, a formação de biomassa pode causar o preenchimento e/ou a colmatção dos espaços vazios dos geossintéticos usados nos sistemas de drenagem; estes efeitos foram descritos por alguns autores [59, 60].

### 3.2.7 - Outros agentes de degradação [4, 5, 7, 11]

Para além dos agentes de degradação descritos nos pontos anteriores, existem ainda outros agentes que podem causar danos nos geossintéticos, tais como: ataque por animais, raízes, radioactividade, fogo, fissuração por tensão ambiental (ESC, do inglês *environmental stress cracking*), acção de cargas estáticas, acção de cargas dinâmicas e abrasão.

**Animais e raízes:** os geossintéticos enterrados no solo podem estar em contacto com vários animais (como roedores ou térmitas) ou com as raízes das plantas. Os animais podem causar danos locais nos geossintéticos (tais como furos), fragilizando-os. As raízes das plantas podem penetrar na estrutura dos geossintéticos, obstruindo-os. Koerner [4] refere que as geomembranas são susceptíveis a sofrer ataques de animais roedores, como os ratos.

**Radioactividade:** a exposição dos geossintéticos a resíduos radioactivos pode causar a ocorrência de danos nos materiais (como por exemplo, a quebra de cadeias poliméricas ou a iniciação de reacções químicas indesejáveis). De um modo geral, os níveis de radioactividade presentes em aterros e lagos de armazenamento de resíduos industriais com baixa radioactividade não são suficientes para causar danos nos geossintéticos [61]. Pelo contrário, os resíduos muito radioactivos podem provocar uma grande degradação nos geossintéticos; Koerner [4] refere que não devem ser usadas geomembranas para a contenção de resíduos com elevada radioactividade (como por exemplo, resíduos oriundos de estações nucleares).

**Fogo:** os geossintéticos podem arder e/ou serem danificados pelo calor gerado pelo fogo. De modo a retardar (e minimizar) os efeitos do fogo podem ser adicionados retardantes de chama à composição dos materiais. No entanto, a ocorrência de fogo em estruturas com geossintéticos é muito pouco provável.

**Fissuração por tensão ambiental:** a ESC pode ocorrer quando alguns geossintéticos (essencialmente as geomembranas) estiverem submetidos a acções mecânicas e na presença de líquidos. A absorção de líquidos provoca o aumento das dimensões dos geossintéticos, originando a separação das cadeias poliméricas. Na presença de tensões mecânicas (menores que a resistência mecânica dos materiais), podem ocorrer roturas frágeis nos geossintéticos (fissuração). A ESC é um exemplo da ocorrência de efeitos sinérgicos na degradação dos geossintéticos.

**Cargas estáticas:** a acção de cargas estáticas pode provocar alterações graduais nas dimensões dos geossintéticos (fluência). No limite, e com o aumento da deformação, essas cargas podem originar a rotura dos geossintéticos (rotura em fluência).

**Cargas dinâmicas:** a acção de cargas dinâmicas intermitentes pode causar a fadiga dos plásticos. A fadiga resulta no aparecimento de fracturas nos plásticos (e, por vezes, em roturas frágeis). O PP é um dos polímeros com maior resistência à fadiga.

**Abrasão:** o desgaste por abrasão resulta do contacto dos geossintéticos com outra superfície ou com outros materiais de construção. O fenómeno de abrasão é muito comum nos geossintéticos aplicados em obras ferroviárias. Nessas aplicações, a acção de cargas cíclicas origina pequenos deslocamentos (fricção) entre os geossintéticos e as partículas de balastro.

### **3.3 - Protecção da degradação - principais aditivos químicos usados em geossintéticos**

#### **3.3.1 - Considerações iniciais**

A resistência dos geossintéticos à degradação pode ser melhorada através da incorporação de vários tipos de aditivos químicos na sua composição, tais como antioxidantes ou estabilizantes UV. Estes aditivos, desde que incorporados correctamente, retardam a degradação dos geossintéticos durante o processo de fabrico, armazenamento e exposição ao ambiente de utilização. Os aditivos químicos podem também ser usados para melhorar as propriedades dos geossintéticos (como por exemplo, os plastificantes) ou para facilitar o processamento dos materiais.

Nos pontos seguintes, descrevem-se os principais tipos de aditivos químicos usados para proteger os geossintéticos da degradação: antioxidantes, estabilizantes UV e pigmentos. A presença destes tipos de aditivos na composição dos geossintéticos permite aumentar o tempo de vida dos materiais.

Os antioxidantes são compostos químicos que inibem ou retardam a oxidação dos polímeros durante o processamento, o armazenamento e o tempo de vida útil do produto final. De acordo com o modo pelo qual interrompem o processo global de oxidação, os antioxidantes podem ser classificados de primários (ou interruptores de cadeia) ou de secundários (ou preventivos).



Por sua vez, os estabilizantes UV permitem reduzir ou retardar a degradação causada pela radiação UV. Os tipos de estabilizantes UV mais comuns incluem: os *UV screeners*, os *UV absorbers*, os *quenchers* e as HALS (*hindered amine light stabilisers* - aminas estericamente bloqueadas).

Os pigmentos são aditivos adicionados aos materiais poliméricos para lhes fornecer cor. Além disso, e dependendo do pigmento usado, podem também ser bons estabilizantes contra a acção de alguns agentes de degradação, como a radiação UV.

### 3.3.2 - Antioxidantes [13-15, 51, 53]

#### 3.3.2.1 - Antioxidantes primários

Os antioxidantes primários (AH) são dadores de átomos de hidrogénio e interrompem o processo de oxidação através da transformação dos radicais de propagação  $R\bullet$  e  $ROO\bullet$  em produtos não reactivos (Reacções 3.9 e 3.10); o radical  $A\bullet$  formado deve originar produtos estáveis (Reacção 3.11).



Para o desempenho das suas funções, os antioxidantes primários têm de competir eficazmente com os passos de propagação do processo de oxidação (Reacções 3.2 e 3.3). A reacção dos antioxidantes primários com o radical  $R\bullet$  é apenas efectiva em condições deficientes de oxigénio (a reacção do  $R\bullet$  com o  $O_2$  ocorre rapidamente - Reacção 3.2).

Os radicais antioxidantes  $A\bullet$  não devem poder continuar a reacção em cadeia, quer por remoção de um átomo de hidrogénio ao polímero RH (Reacção 3.12), quer por reacção com o oxigénio (Reacção 3.13).



Do mesmo modo, o antioxidante AH também não pode reagir com o oxigénio, de modo a formar radicais livres reactivos (Reacção 3.14); tal seria uma reacção pró-oxidante.



Os antioxidantes primários mais vulgares incluem os fenóis estericamente bloqueados (em inglês, *sterically hindered phenols*) e as aminas secundárias; normalmente, são utilizados em quantidades entre os 0,02 e 1% (*m/m*).

Os grupos reactivos OH (fenóis) e NH (aminas) podem doar um átomo de hidrogénio aos radicais  $R\bullet$ ,  $RO\bullet$  ou  $ROO\bullet$ , de modo a formar um produto estável e inactivo (Figura 3.8). Os radicais livres (fenol ou amina) formados não extraem átomos de hidrogénio das moléculas de polímero circundantes e,

assim, não propagam a reacção (o anel aromático ou os substituintes alquilo R estabilizam o radical livre). Estes radicais livres podem sofrer re-arranjos e podem combinar-se com outros radicais livres para formarem produtos inactivos.

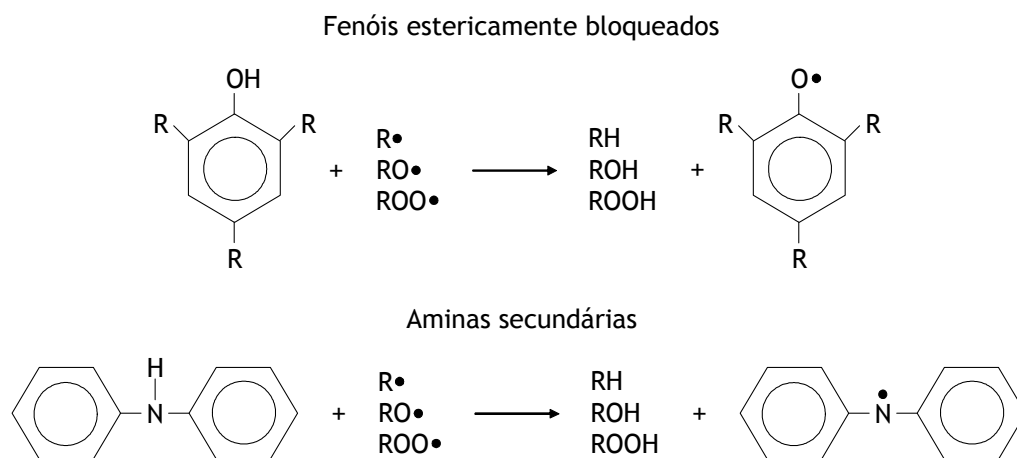


Figura 3.8 - Modo de acção dos antioxidantes primários (adaptado de [51]).

Os fenóis estericamente bloqueados são os antioxidantes primários mais utilizados para estabilizar o PP; um dos mais comuns é o 2,6-di-*t*-butil-4-metilfenol, mais conhecido por BHT (Figura 3.9). As HALS, normalmente utilizadas para estabilizar o PP contra os efeitos degenerativos da radiação UV, começaram recentemente a ser usadas como substitutos dos fenóis.

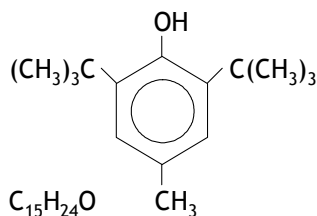


Figura 3.9 - Fórmula de estrutura do BHT (2,6-di-*t*-butil-4-metilfenol).

### 3.3.2.2 - Antioxidantes secundários

Os antioxidantes secundários mais usados são os decompositores de peróxidos. Além destes, existem ainda os desactivadores de metais e os *UV absorbers*.

Os decompositores de peróxidos retardam ou inibem o processo oxidativo através da decomposição dos hidroperóxidos em produtos não reactivos (impedindo, assim, a proliferação dos radicais livres reactivos).

Os fosfitos e os tioésteres são os decompositores de peróxidos mais usados. Ambos os tipos reduzem os hidroperóxidos a álcoois estáveis numa reacção de oxidação-redução. Nessa reacção, os fosfitos e os tioésteres são oxidados a fosfatos e a sulfóxidos, respectivamente (Figura 3.10).

A Figura 3.11 ilustra as fórmulas estruturas de alguns antioxidantes secundários.

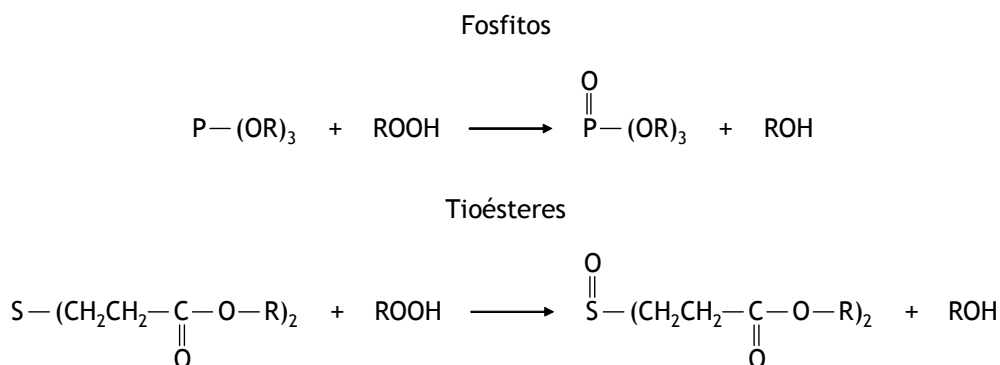


Figura 3.10 - Modo de acção dos antioxidantes secundários (adaptado de [51]).

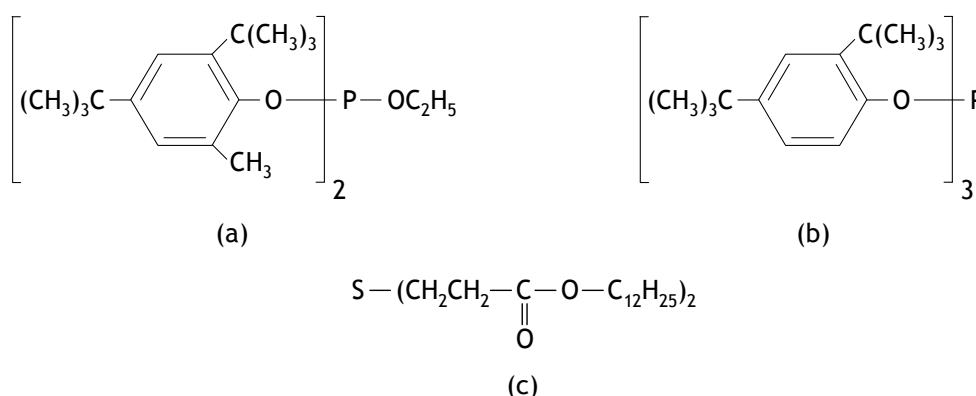


Figura 3.11 - Fórmulas de estrutura de alguns antioxidantes secundários:  
 (a) Irgafos 38 (fosfito); (b) Irgafos 168 (fosfito); (c) Irganox PS 800 (tioéster).  
 (os aditivos Irgafos 38, Irgafos 168 e Irganox PS 800 foram desenvolvidos pela Ciba)

Os desactivadores de metais retardam a oxidação dos polímeros catalisada pelos metais; o contacto dos polímeros com os metais pode ocorrer, por exemplo, quando as poliolefinas ou o PVC são usados como isoladores de fios de cobre ou cabos eléctricos. O cobre (tal como outros catiões metálicos) é um pró-oxidante que pode acelerar a decomposição dos hidroperóxidos em radicais livres reactivos.

Os desactivadores de metais são normalmente compostos quelantes que podem formar complexos estáveis com os metais, reduzindo a sua actividade catalítica. O Irganox MD-1024 é um exemplo de um desactivador de metais (Figura 3.12); o Irganox MD-1024 pode também actuar como antioxidante primário.

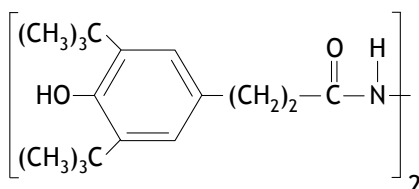


Figura 3.12 - Fórmula de estrutura do Irganox MD-1024 (desactivador de metais).  
 (o Irganox MD-1024 foi desenvolvido pela Ciba)

Por último, os *UV absorbers* serão discutidos no ponto 3.3.3.2; exemplos incluem o Tinuvin 326 e o Chimassorb 81.

Os antioxidantes secundários são normalmente combinados com antioxidantes primários para obter efeitos de protecção sinérgicos. Com uma combinação adequada, a estabilização obtida é maior que a soma do efeito de cada antioxidante isolado. Os sinergismos podem ocorrer de duas formas: um antioxidante regenerar o outro ou os dois antioxidantes actuarem por mecanismos diferentes.

### 3.3.3 - Estabilizantes UV

#### 3.3.3.1 - *UV screeners* [15, 51, 62, 63]

Os *UV screeners* protegem os polímeros absorvendo e/ou reflectindo a radiação UV; normalmente são pigmentos (ou revestimentos reflectivos) adicionados aos polímeros para fornecer opacidade ou transparência. O negro de carbono e o dióxido de titânio são dois pigmentos bastante usados como *UV screeners* em materiais poliméricos (as principais características do negro de carbono podem ser encontradas no ponto 3.4.5). Os *UV screeners* podem ser combinados com outros aditivos químicos (*UV absorbers*, antioxidantes ou HALS) para obter uma melhor protecção contra a radiação UV.

#### 3.3.3.2 - *UV absorbers* [15, 51, 52, 63]

Os *UV absorbers* são compostos foto-estáveis que absorvem a radiação UV e libertam o excesso de energia sob a forma de calor; estes aditivos possuem uma grande capacidade de absorção na zona UV. Os *UV absorbers* não devem absorver na zona visível (ou então devem possuir uma absorção negligenciável nessa zona). Caso contrário, pode ocorrer a formação de cor no artefacto polimérico, o que, em muitos casos, pode ser um problema.

Os *UV absorbers* são moléculas tautoméricas (Figura 3.13). A absorção da radiação UV causa uma redistribuição dos electrões na molécula (de A para B - Figura 3.13). Após a libertação da energia sob a forma de calor, os electrões sofrem um re-arranjo (de B para A - Figura 3.13) para dar origem ao tautómero original (que pode, novamente, absorver a radiação UV). As formas tautoméricas, com diferentes distribuições electrónicas (mas com a mesma massa molecular e arranjo atómico), estão em equilíbrio e são facilmente interconvertíveis.

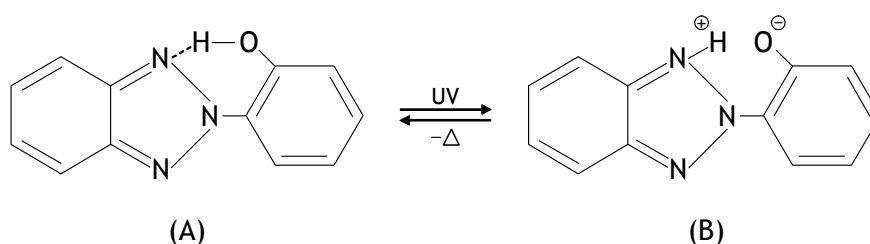
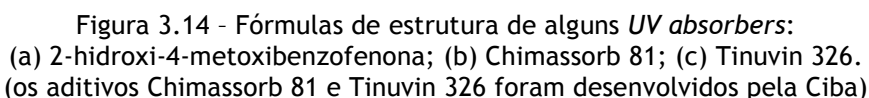
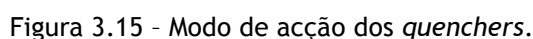


Figura 3.13 - Modo de acção dos *UV absorbers* (adaptado de [51]).

Os *UV absorbers* normalmente adicionados ao PP incluem as benzofenonas e as benzotriazolas. A Figura 3.14 ilustra as fórmulas de estrutura de alguns *UV absorbers*.



Os *quenchers* são capazes de reagir com as moléculas activadas dos polímeros (aceitam a energia dum cromóforo no estado excitado) (Figura 3.15). O cromóforo, após transmitir a sua energia, volta ao estado fundamental (estado de energia estável). O *quencher* dissipa o excesso de energia sob a forma de calor, fluorescência ou fosforescência (mecanismos que não provocam danos nas cadeias poliméricas).



The chemical structure shows a central nickel atom (Ni) coordinated by two phenoxide oxygen atoms and two imine nitrogen atoms. The ligands are 2,6-dimethylphenol (left) and 2,4-dimethylphenol (right). The 2,6-dimethylphenol ligand has methyl groups at the 2 and 6 positions, while the 2,4-dimethylphenol ligand has methyl groups at the 2 and 4 positions. The nickel atom is coordinated to the oxygen atoms of the phenoxide groups and the nitrogen atoms of the imine groups, forming a square planar geometry.

Página 69

**3.3.3.4 - HALS** [51, 52, 64-66]

As HALS são normalmente derivadas da estrutura da 2,2,6,6-tetrametilpiperidina (Figura 3.17) e são utilizadas, desde a década de 70, na estabilização de polímeros. Actualmente, as HALS dominam o mercado dos estabilizantes UV e podem também ser usadas como antioxidantes térmicos. A Figura 3.18 ilustra a estrutura de algumas HALS actualmente disponíveis no mercado (outros exemplos de HALS incluem o Chimassorb 944 e o Tinuvin 622 - estruturas apresentadas nos pontos 3.4.2 e 3.4.3, respectivamente).

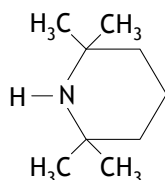


Figura 3.17 - Fórmula de estrutura da 2,2,6,6-tetrametilpiperidina.

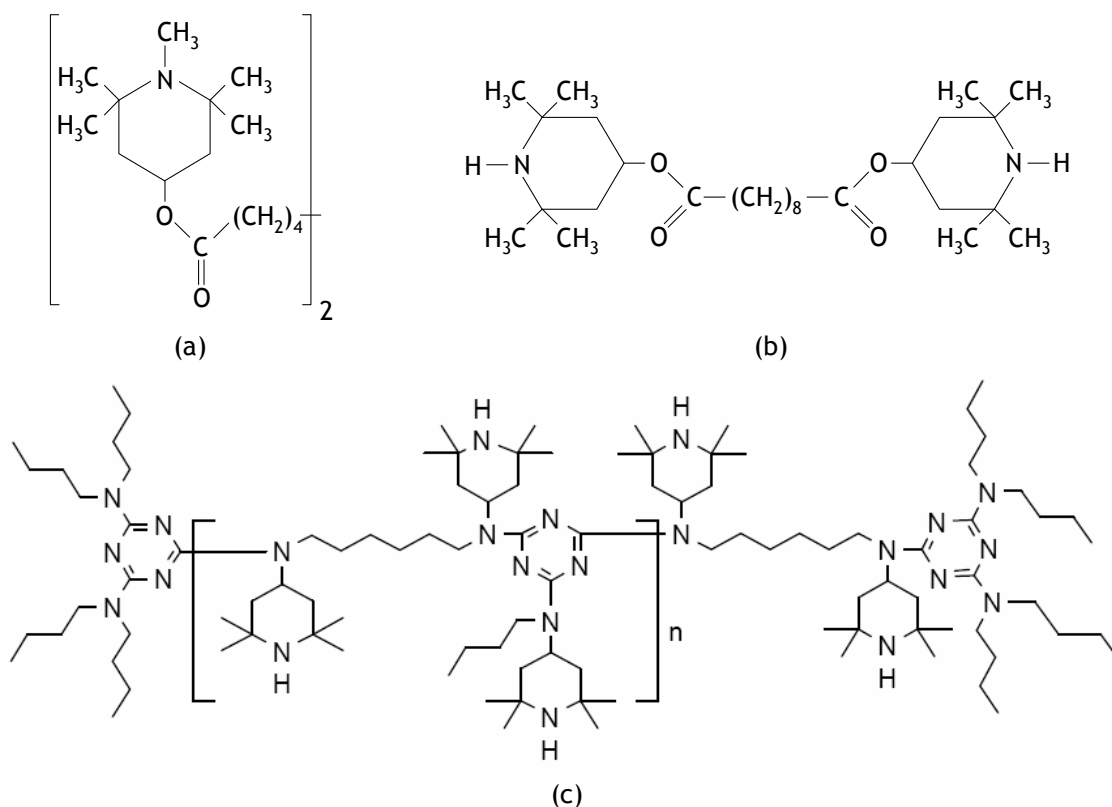


Figura 3.18 - Fórmulas de estrutura de algumas HALS:

(a) Tinuvin 765; (b) Tinuvin 770; (c) Chimassorb 2020.

(os aditivos Tinuvin 765, Tinuvin 770 e Chimassorb 2020 foram desenvolvidos pela Ciba)

De um modo geral, as HALS possuem boa estabilidade a temperaturas elevadas, baixa volatilidade e são resistentes à extracção. A concentração típica das HALS nos plásticos varia entre 0,1% e 1,5%. As HALS podem ser usadas isoladamente ou em combinação com outros aditivos como antioxidantes, *UV absorbers* ou *quenchers*.

Os mecanismos de actuação das HALS são bastante complexos e ainda não se encontram totalmente esclarecidos. Um dos mecanismos existentes para descrever o modo de actuação das HALS é o ciclo de Denisov (Figura 3.19).

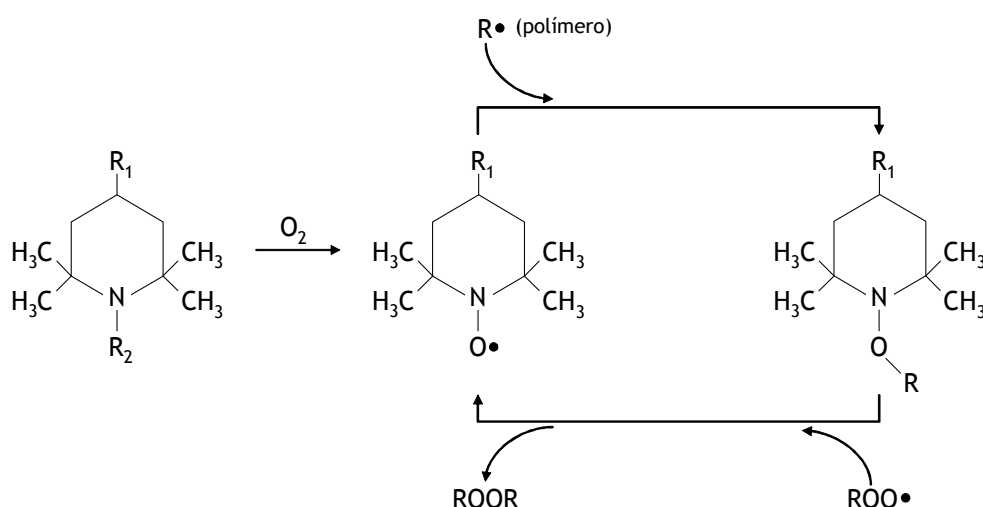


Figura 3.19 - Modo de acção das HALS - ciclo de Denisov (adaptado de [51] e de [64]).

De acordo com o ciclo de Denisov, a amina é oxidada, dando origem a um radical nitroxil ( $NO\bullet$ ). Em seguida, o radical  $NO\bullet$  reage com os radicais livres  $R\bullet$ , dando origem a uma alquinoxiamina ( $NOR$ ). A alquinoxiamina reage com os radicais peróxido ( $ROO\bullet$ ), regenerando o radical  $NO\bullet$  (que pode iniciar novamente o ciclo de protecção). As HALS funcionam como armadilhas de radicais, interrompendo o mecanismo de oxidação em cadeia.

O mecanismo de actuação cíclico proposto para as HALS envolve múltiplas regenerações dos radicais  $NO\bullet$ . O excelente desempenho das HALS, mesmo em baixas concentrações, está de acordo com este mecanismo não sacrificial.

No entanto, o modo de actuação das HALS parece ser muito mais complexo do que o apresentado no ciclo de Denisov. É actualmente aceite que as HALS funcionam por um mecanismo onde as principais actividades são o bloqueio dos radicais livres, a decomposição dos peróxidos em espécies inactivas e o *quenching* de complexos de transferência de carga polímero-oxigénio.

As características de três HALS - Chimassorb 944, Tinuvin 622 e Tinuvin 783 - podem ser encontradas nos pontos 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4, respectivamente.

### 3.3.4 - Pigmentos [51, 66- 68]

A cor dos materiais poliméricos pode ser obtida através da adição de pigmentos ou de corantes. Os pigmentos são sólidos finamente divididos praticamente insolúveis no meio onde estão inseridos; são incorporados por dispersão enquanto o polímero se encontra na fase líquida e, após a solidificação, ficam fisicamente retidos na estrutura dos materiais. Por sua vez, os corantes são solúveis no meio de aplicação, sendo normalmente retidos como consequência da sua afinidade com as moléculas dos polímeros.

Os pigmentos são normalmente preferidos aos corantes para a coloração de plásticos. Os corantes são pouco compatíveis com as poliolefinas e normalmente não fornecem protecção contra os efeitos da radiação UV (ao contrário de alguns pigmentos, como o negro de carbono ou como o dióxido de titânio). Os pigmentos podem ser orgânicos (como as ftalocianinas azuis ou verdes) ou inorgânicos (como o dióxido de titânio, o óxido de zinco ou o óxido de ferro).

Os pigmentos são compostos químicos adicionados aos materiais poliméricos para lhes fornecer cor, quer por razões estéticas ou decorativas, quer para identificação (por exemplo, os códigos de cores dos cabos eléctricos). Além disso, podem influenciar a transparência ou opacidade dos materiais.

Os pigmentos podem, também, desempenhar um papel importante a retardar ou a inibir o processo de degradação de muitos materiais poliméricos; o negro de carbono é um exemplo típico de um *UV screener* muito efectivo. De facto, alguns pigmentos absorvem a radiação UV nociva, protegendo os polímeros da ocorrência de fenómenos foto-oxidativos.

As características de dois tipos de pigmentos, o negro de carbono (preto) e as ftalocianinas de cobre (azuis ou verdes), podem ser encontradas nos pontos 3.4.5 e 3.4.6, respectivamente.

### **3.4 - Aditivos químicos presentes nos geossintéticos estudados neste trabalho**

#### **3.4.1 - Considerações iniciais**

A maioria dos geossintéticos estudados neste trabalho possuía aditivos químicos (estabilizantes UV e pigmentos) na sua composição. Nos pontos seguintes, procede-se à apresentação das características desses aditivos: três HALS (Chimassorb 944, Tinuvin 622 e Tinuvin 783) e dois tipos de pigmentos (o negro de carbono e as ftalocianinas de cobre).

Na execução experimental do trabalho, procedeu-se ao desenvolvimento de uma metodologia para a determinação do Chimassorb 944 em geotêxteis. Assim, durante a apresentação do Chimassorb 944, procede-se, também, a uma breve discussão sobre os métodos existentes para a análise de aditivos em polímeros (com indicação dos métodos existentes na literatura para a extracção e determinação do Chimassorb 944).

#### **3.4.2 - Chimassorb 944**

##### **3.4.2.1 - Principais características [69]**

O Chimassorb 944 (C944) é um aditivo de elevada massa molecular desenvolvido pela Ciba; funciona como estabilizante UV (família das HALS), mas pode também proteger os polímeros contra os efeitos da oxidação induzida pela temperatura. O C944 possui excelente compatibilidade com os polímeros, alta resistência à extracção e baixa volatilidade.

A fórmula de estrutura do C944 encontra-se ilustrada na Figura 3.20; o Quadro 3.1 resume algumas características deste aditivo.



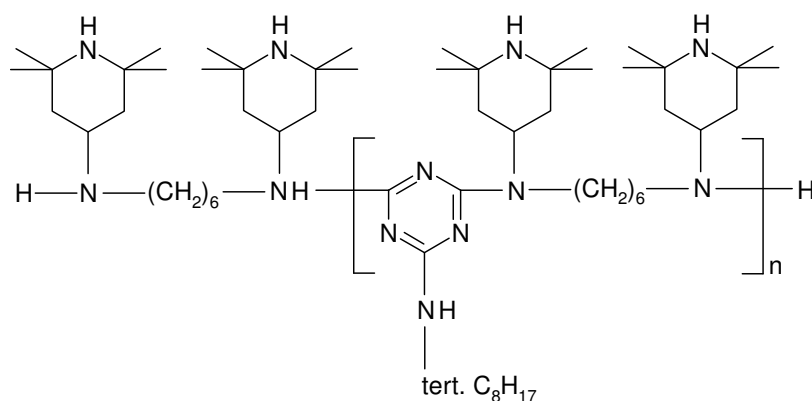


Figura 3.20 - Fórmula de estrutura do Chimassorb 944.

Quadro 3.1 - Características do Chimassorb 944.

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Número de registro CAS*                | 71878-19-8                    |
| Massa molecular                        | 2000-3100 g.mol <sup>-1</sup> |
| Massa volúmica (20 °C)                 | 1,01 g.cm <sup>-3</sup>       |
| Solubilidade (20 °C) (g/100 g solução) |                               |
| Acetato de etilo                       | > 50                          |
| Acetona                                | > 50                          |
| Água                                   | < 0,01                        |
| Clorofórmio                            | > 30                          |
| Diclorometano                          | > 50                          |
| Etanol                                 | < 0,1                         |
| n-Hexano                               | 41                            |
| Metanol                                | 3                             |
| Tolueno                                | > 50                          |
| Perda de massa (volatilidade) (%)      |                               |
| 250 °C                                 | 0                             |
| 300 °C                                 | 1,0                           |
| 350 °C                                 | 9,4                           |

\*número de registro no *Chemical Abstracts Service* (CAS)

O C944 é normalmente aplicado em poliolefinas (PE e PP), copolímeros de olefinas e misturas de PP com elastómeros. Nalgumas situações, é também efectivo em poliamidas, poliacetais, poliuretanos, PVC e em certos elastómeros de estireno. A quantidade de C944 necessária para a estabilização UV das fibras de PP varia normalmente entre os 0,10% e os 1,0% (*m/m*).

#### 3.4.2.2 - Determinação do Chimassorb 944 em materiais poliméricos

##### Processos de extracção [70-72]

A maioria dos métodos existentes para a determinação de aditivos em materiais poliméricos engloba um processo de extracção prévio para separar o(s) aditivo(s) dos restantes componentes da amostra. O processo de extracção deve ser o mais selectivo possível, de modo a remover do polímero apenas os compostos de interesse. Os processos de extracção não devem, em nenhuma situação, modificar ou degradar os aditivos.

Os processos de extracção tradicionais são normalmente divididos em duas categorias: dissolução do polímero e métodos de extracção líquido-sólido. Em alguns casos, as amostras são moídas antes do processo de extracção (de modo a aumentar a razão entre a área de superfície e o volume e, assim, melhorar a eficiência da extracção).

A dissolução (e posterior precipitação) do polímero é um método bastante eficiente para extrair os aditivos presentes em muitos materiais poliméricos. As poliolefinas são normalmente dissolvidas na presença de tolueno ou xileno, a temperaturas elevadas. Após a dissolução da amostra, o polímero é re-precipitado por arrefecimento ou pela adição de metanol ou acetona (os aditivos permanecem na solução que, após filtração, pode ser analisada).

Os métodos de extracção líquido-sólido englobam normalmente a extracção Soxhlet, o refluxo (sem dissolução do polímero) e a extracção por ultra-sons. Nestes métodos, os aditivos são extraídos dos materiais poliméricos por um líquido, que depois é separado por meios físicos (como a filtração).

Os principais inconvenientes dos processos tradicionais de extracção (com a excepção da extracção por ultra-sons) são o longo tempo de extracção (tipicamente de 6 a 48 horas na extracção Soxhlet), o elevado consumo de solventes orgânicos (nocivos para o ambiente) e a necessidade de montagens experimentais complexas e não automatizadas (tornando as técnicas muito trabalhosas).

A extracção por ultra-sons é um método simples, relativamente rápido (cerca de 1 hora) e permite a extracção simultânea de várias amostras. Neste método, a agitação induzida pelos ultra-sons origina a extracção dos aditivos.

A eficiência do processo de extracção líquido-sólido pode ser influenciada por muitos factores, tais como: a massa molecular do aditivo, a solubilidade do aditivo no solvente de extracção, a densidade do polímero e o grau de cristalinidade do polímero.

Em alguns casos, o rendimento do processo de extracção líquido-sólido é muito baixo (a quantidade de aditivo extraído é muito pequena). Nesses casos, a dissolução da amostra é um modo efectivo de libertar os aditivos presentes no material polimérico. No entanto, é essencial que depois não ocorra a inclusão dos aditivos no re-precipitado.

Mais recentemente, foram desenvolvidos novos métodos para a extracção dos aditivos presentes nos materiais poliméricos, tais como a extracção por microondas, a extracção por fluidos supercríticos e a extracção por solvente acelerada. As vantagens destes métodos incluem a diminuição do tempo de extracção, a redução do consumo de solventes e a automatização parcial do processo de extracção. No entanto, requerem equipamentos específicos, que podem ser dispendiosos.

Os métodos existentes na literatura para a determinação do C944 em materiais poliméricos incluem normalmente a extracção do aditivo por dissolução-precipitação [73-78]. Os polímeros (em todos os casos, poliolefinas) são dissolvidos em tolueno [74, 76, 77], em decalina [73] ou em xileno [78]. A re-precipitação do polímero ocorre por arrefecimento [73, 78] ou pela adição de outros solventes orgânicos, como o metanol [74, 77] ou a acetona [76].

O C944 pode também ser removido dos materiais poliméricos através de extracção por ultra-sons [79], extracção Soxhlet [73] ou extracção por refluxo. No entanto, a extracção Soxhlet durante 16 horas com clorofórmio originou uma baixa recuperação do C944 existente em PP [73]. Por sua vez, a extracção por ultra-sons com clorofórmio (60 °C, 60 minutos) permitiu obter taxas de recuperação elevadas do C944 existente em filmes de PE [79].

#### **Métodos de análise** [70, 71]

Os métodos existentes para a determinação dos aditivos presentes nos materiais poliméricos podem ser divididos em métodos directos (sem extracção prévia dos aditivos) e em métodos indirectos. No entanto, as interferências e as baixas quantidades de aditivos normalmente presentes nos materiais poliméricos tornam a extracção indispensável na maioria dos casos: Assim, os métodos directos são pouco comuns (a vantagem dos métodos directos é a maior rapidez e simplicidade de análise).

A maioria dos métodos indirectos para a determinação de aditivos em materiais poliméricos envolve técnicas cromatográficas, como a cromatografia gasosa, a cromatografia líquida de alta eficiência e a cromatografia de exclusão molecular; após separação no sistema cromatográfico, a espectroscopia UV e a espectrometria de massa são frequentemente usadas para detectar os aditivos.

Existem alguns métodos que usam a espectroscopia UV (sem separação cromatográfica prévia) para a determinação de aditivos em materiais poliméricos. No entanto, na maioria dos casos, a presença de compostos interferentes impede ou dificulta a determinação do aditivo em análise. Deste modo, a separação cromatográfica antes da detecção é quase sempre necessária.

Outras técnicas existentes para a determinação de aditivos em polímeros incluem a espectroscopia de infravermelho e a ressonância magnética nuclear. Mais recentemente, a cromatografia de fluidos supercríticos foi também aplicada para a análise de aditivos em materiais poliméricos.

Os métodos existentes na literatura para determinar o C944 em polímeros são quase todos baseados em técnicas cromatográficas: cromatografia líquida de alta eficiência [74, 75, 77, 78, 80-82] e cromatografia gasosa [77, 83, 84]. Nos métodos envolvendo cromatografia líquida de alta eficiência, a separação pode ser obtida usando colunas de fase reversa ( $C_8$  ou  $C_{18}$ ) [75, 77, 78, 81], de fase normal [75] ou amina [75]; a detecção do C944 pode ser UV [77, 78, 81, 82], por ionização de chama [80] ou por ELSD (do inglês, *evaporative light scattering detection*) [77].

Os métodos com cromatografia gasosa [77, 83, 84] envolvem a pirólise do C944 (a pirólise consiste na decomposição de compostos por acção do calor; a pirólise de alguns aditivos origina produtos de degradação mais pequenos que podem ser analisados por cromatografia gasosa). O acoplamento da detecção por espectrometria de massa à pirólise e à cromatografia gasosa pode permitir a distinção de aditivos com estruturas químicas semelhantes [77].

Outros métodos para a determinação do C944 envolvem técnicas como a espectroscopia UV [73, 79] ou a espectrometria de massa [76] (métodos sem uma separação cromatográfica prévia, mas com a extracção prévia do aditivo).

### 3.4.3 - Tinuvin 622 [85]

O Tinuvin 622 (T622) é um estabilizante UV da família das HALS desenvolvido pela Ciba; é também efectivo como antioxidante e pode contribuir significativamente para a estabilidade térmica a longo prazo das poliolefinas (Figura 3.21, Quadro 3.2).

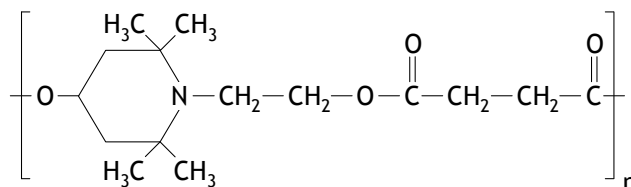


Figura 3.21 - Fórmula de estrutura do Tinuvin 622.

Quadro 3.2 - Características do Tinuvin 622.

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Número de registro CAS*                | 65447-77-0                    |
| Massa molecular                        | 3100-4000 g.mol <sup>-1</sup> |
| Massa volúmica (20 °C)                 | 1,22 g.cm <sup>-3</sup>       |
| Solubilidade (20 °C) (g/100 g solução) |                               |
| Acetato de etilo                       | 3                             |
| Acetona                                | 4                             |
| Clorofórmio                            | > 40                          |
| Diclorometano                          | > 40                          |
| Etanol                                 | 0,08                          |
| n-Hexano                               | < 0,01                        |
| Metanol                                | 0,05                          |
| Tolueno                                | 15                            |
| Água                                   | < 1,6 mg.L <sup>-1</sup>      |
| Perda de massa (volatilidade) (%)      |                               |
| 200 °C                                 | 0,1                           |
| 250 °C                                 | 0,4                           |
| 300 °C                                 | 3,1                           |
| 325 °C                                 | 8,4                           |

\*número de registro no *Chemical Abstracts Service* (CAS)

O T622 é normalmente aplicado em poliolefinas (PE e PP), copolímeros de olefinas e misturas de PP com elastómeros. Em determinados casos, é também efectivo em poliamidas, em poliacetais e em poliuretanos. A eficiência do T622 é maior que a dos *UV absorbers*, particularmente em sistemas pigmentados. As combinações de T622 com *UV absorbers* ou com outras HALS resulta, em muitos casos, em efeitos sinérgicos; um exemplo típico é o Tinuvin 783 (T783).

### 3.4.4 - Tinuvin 783 [86]

O Tinuvin 783 é uma mistura de C944 com T622; é um estabilizante UV com excelente resistência à extracção e baixa interacção com pigmentos. As áreas de aplicação do T783 incluem as poliolefinas (PE e PP), os copolímeros de olefinas e as misturas de PP com elastómeros. O teor de T783 presente nos materiais poliméricos varia normalmente entre os 0,1% e os 1,0%.

O sinergismo entre as duas HALS de elevada massa molecular (C944 e T622) proporciona um sistema de estabilização efectivo para a protecção dos polímeros contra a degradação causada pela radiação UV e pela exposição a temperaturas elevadas.

### 3.4.5 - Negro de carbono [87]

O negro de carbono (também conhecido como negro de fumo) é formado pela decomposição térmica (pirólise) ou combustão de hidrocarbonetos. É um dos pigmentos (índice de cor internacional PBL-7) mais utilizados na indústria dos plásticos, por vários motivos: elevado poder de pigmentação, baixo custo, alta eficiência e excelente desempenho (quer como colorante, quer como estabilizante UV).

O negro de carbono é usado para fornecer cor e opacidade, para proteger os polímeros da radiação UV, para alterar as propriedades eléctricas dos plásticos e, até, para reforço. O negro de carbono deve estar uniformemente disperso por todo o plástico; a qualidade dessa dispersão é determinante para o seu desempenho.

O negro de carbono é composto por partículas esféricas de carbono elementar com diâmetro entre os 10 e os 100 nm e uma área de superfície entre os 25 e os 1500 m<sup>2</sup>/g; estas partículas agrupam-se formando agregados (unidades características do negro de carbono). As propriedades das partículas e dos agregados são determinantes para o desempenho do negro de carbono.

A área de superfície do negro de carbono aumenta à medida que o tamanho das partículas primárias diminui; a área de superfície afecta a intensidade da cor negra, a condutividade e a capacidade de absorção de radiação UV. Os negros de carbono com maiores áreas de superfície possuem cor mais intensa e maior resistência à radiação UV (pois existe uma maior área disponível para a absorção de radiação visível e UV).

A estrutura do negro de carbono é um aspecto muito importante para o desempenho do pigmento; a estrutura é determinada pelo número de partículas primárias por agregado e pelo tamanho e forma do agregado. O negro de carbono pode ser classificado de baixa estrutura ou de alta estrutura: é de baixa estrutura quando os agregados são constituídos por poucas partículas primárias (unidades mais compactas); é de alta estrutura, quando os agregados são formados por muitas partículas primárias e possuem ramificação considerável (Figura 3.22).

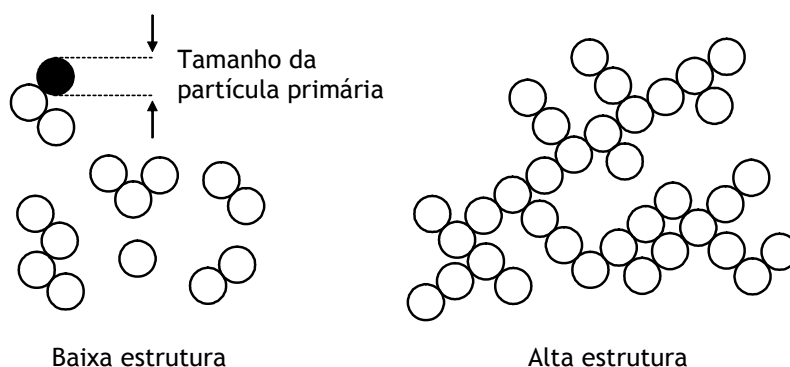


Figura 3.22 - Partículas de negro de carbono.

O negro de carbono possui cor preta devido a absorver a energia de todos os comprimentos de onda do espectro visível. Os negros de carbono com partículas primárias mais pequenas absorvem melhor a radiação visível (dado possuírem uma maior área de superfície). Existem vários tipos de negro de carbono (grande gama de níveis de cor) para atender aos requerimentos de todos os plásticos.

O negro de carbono absorve e/ou dispersa a radiação UV; deste modo, protege os plásticos contra os efeitos da radiação UV. A capacidade protectora do negro de carbono é dependente do tamanho das partículas primárias, da estrutura do agregado, da concentração e da dispersão do pigmento nos plásticos. Os negros de carbono com maior área de superfície (partículas primárias mais pequenas) possuem maior capacidade de estabilização UV. O negro de carbono usado para a protecção UV dos polímeros usados em geossintéticos possui partículas primárias na gama dos 22 a 25 nm [55].

A quantidade de negro de carbono necessária para proteger os plásticos da radiação UV depende da forma e da espessura do artefacto polimérico, das condições de exposição e das características do próprio negro de carbono. A incorporação de 2 a 3% (percentagens em massa) de negro de carbono é normalmente suficiente para uma protecção óptima contra a radiação UV.

O negro de carbono é unanimemente considerado como um eficiente *UV screener* na protecção de poliolefinas contra a foto-oxidação. O papel do negro de carbono na protecção da oxidação térmica é mais controverso: o negro de carbono pode bloquear radicais livres ou interagir com antioxidantes presentes no plástico, tanto positivamente, como negativamente [88, 89].

#### 3.4.6 - Ftalocianinas de cobre [67, 68, 90]

As ftalocianinas de cobre azuis e verdes estão entre os pigmentos orgânicos mais usados na indústria dos materiais poliméricos. Possuem uma excelente resistência ao calor, à radiação UV, a substâncias químicas como ácidos ou bases e à migração; além disso, são pigmentos relativamente baratos. As fórmulas de estrutura de duas ftalocianinas de cobre encontram-se ilustradas na Figura 3.23.

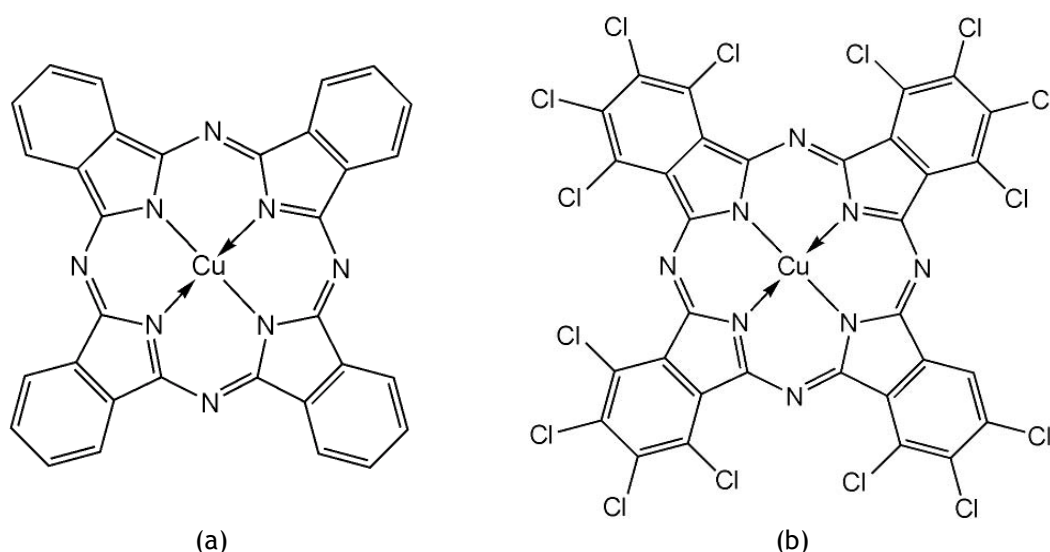


Figura 3.23 - Fórmulas de estrutura das ftalocianinas de cobre: (a) ftalocianina de cobre azul; (b) ftalocianina de cobre verde.

As ftalocianinas de cobre verdes são moléculas em que a maioria dos 16 átomos de hidrogénio dos 4 anéis exteriores estão substituídos por halogéneos; incluem derivados com cloro, com bromo ou com uma mistura dos dois halogéneos (a tonalidade verde do pigmento torna-se progressivamente mais amarela com o aumento do conteúdo de bromo). As ftalocianinas de cobre azuis são moléculas onde não ocorreu a substituição dos hidrogénios por halogéneos.

### 3.5 - Métodos para avaliar a durabilidade dos geossintéticos

#### 3.5.1 - Considerações iniciais

Ao longo dos últimos anos, a indústria dos geossintéticos, as comissões técnicas de normalização (na área dos geossintéticos) e a comunidade científica em geral têm vindo a desenvolver vários métodos para avaliar a durabilidade dos geossintéticos. Actualmente, muitos desses métodos estão descritos em várias normas nacionais, europeias e internacionais.

A resistência dos geossintéticos à degradação pode ser avaliada *in situ* (degradação sob condições naturais) ou em laboratório (degradação sob condições normalmente aceleradas). A aceleração das condições de degradação é vulgarmente conseguida através do aumento da temperatura ou através do aumento da intensidade (concentração) do agente de degradação.

Os danos sofridos pelos geossintéticos (nos ensaios de durabilidade) são normalmente quantificados através da determinação (antes e depois da exposição aos vários agentes de degradação) de diversas características e/ou propriedades dos materiais, e posterior comparação dos resultados obtidos para os materiais expostos com os resultados obtidos para os materiais de referência (sem degradação).

Nos pontos seguintes, procede-se à apresentação dos métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos aos diferentes agentes de degradação. Para alguns agentes de degradação, serão indicadas as principais características dos estudos encontrados na literatura relativos à avaliação da resistência dos geossintéticos a esses agentes.

#### 3.5.2 - Resistência aos líquidos

Os métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos aos líquidos envolvem ensaios de imersão; os geossintéticos podem ser imersos *in situ* ou em laboratório.

Os efeitos dos ensaios de imersão podem ser físicos (absorção do líquido com consequente dilatação dos materiais, perda de aditivos) ou químicos (reacção química com o líquido de imersão - reacções normalmente aceleradas pelo aumento da temperatura).

O CEN TC 189 desenvolveu vários métodos para determinar a resistência dos geossintéticos à acção dos líquidos: EN 14030:2001 (resistência a soluções ácidas e alcalinas); EN 12447:2001 (resistência à hidrólise); EN 14414:2004 (resistência química para utilização em aterros de resíduos - resistência a ácidos, a bases, solvatação e dilatação, lixiviados sintéticos e lixiviados reais); EN 14415:2004 (para as barreiras geossintéticas, resistência à lixiviação). Os procedimentos das normas EN 14030:2001 e EN 12447:2001 (métodos de ensaio usados neste trabalho) encontram-se descritos no ponto 6.2.

A ISO TC 221 possui um método (ISO/TR 12960:2000) para determinar a resistência de geotêxteis (e de produtos relacionados) a líquidos.

A comissão D35 da ASTM também elaborou métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos a líquidos: ASTM D5322-98(2009) (procedimentos de imersão); ASTM D5747-08 (geomembranas); ASTM D6213-97(2009) (geogrelhas); ASTM D6388-99(2005) (geogrelhas); ASTM D6389-99(2005) (geotêxteis); ASTM D5496-98(2009) (procedimentos para imersão *in situ*).

Por fim, outras normas, como a ASTM D543-06 (comissão D20 da ASTM - Plásticos) ou a ISO 175:1999 (ISO TC 61 - Plásticos), podem também ser usadas para avaliar a resistência de alguns geossintéticos (como as geomembranas) a líquidos.

As principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos aos líquidos encontram-se resumidas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos aos líquidos.

| Autores                     | Ano  | Principais características do estudo   |
|-----------------------------|------|--|
| Eith e Koerner [91]         | 1997 | Geomembranas de PEAD após 8 anos de operação num aterro de resíduos (imersão em lixiviados).   |
| Elias <i>et al.</i> [92]    | 1998 | Geotêxteis de PET e geogrelha de PET (com revestimento de PVC); imersões (entre os 40 °C e os 90 °C) em soluções de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 1), de NaOH (pH 10 e pH 12), de Ca(OH) <sub>2</sub> (pH 10) e em água desionizada (pH 7); imersões durante um período máximo de 42 meses. |
| Lopes e Monteiro [93]       | 1999 | Geotêxteis não-tecidos de PP; imersão <i>in situ</i> durante um período máximo de 30 semanas numa lagoa de lixiviados; imersões em laboratório em soluções de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub> , NaOH e NaCl.  |
| Lopes e Monteiro [94]       | 1999 | Geomembranas de PEAD; imersão <i>in situ</i> durante um período máximo de 30 semanas numa lagoa de lixiviados; imersões em laboratório em soluções de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub> , NaOH e NaCl.  |
| Reddy <i>et al.</i> [95]    | 2000 | Geogrelhas de PEAD e de PET; imersões (a 35 °C, 50 °C e 65 °C) em vários líquidos; tempo máximo de imersão de 417 dias.  |
| Santos <i>et al.</i> [96]   | 2002 | Geotêxteis não-tecidos de PP e de PET; imersões de acordo com a EN 14030:2001.   |
| Carneiro <i>et al.</i> [97] | 2004 | Geotêxteis tecidos e não-tecidos de PP; imersões de acordo com a EN 14030:2001.  |
| Lodi e Bueno [98]           | 2004 | Geomembranas de PEAD e de PVC; imersão de 30 meses em lixiviados (1000 L) e de 7 meses em resíduos de nióbio (60% de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).   |
| Stark <i>et al.</i> [99]    | 2004 | Geomembranas de PVC; imersão durante 120 dias num lixiviado sintético (a 23 °C e a 50 °C).   |
| Rahman e Alfaro [100]       | 2004 | Geotêxteis de PET; imersão em várias soluções alcalinas.   |

(o Quadro 3.3 continua na página seguinte)



(continuação do Quadro 3.3)

|                                     |      |   |
|-------------------------------------|------|---|
| Gulec <i>et al.</i> [101]           | 2004 | Geomembranas de PEAD; imersão numa solução ácida sintética de resíduos metálicos de minas (pH 2.1) durante 24 meses a 20 °C, 40 °C e 60 °C.   |
| Gomes <i>et al.</i> [102]           | 2006 | Geotêxteis não tecidos de PET e de PP-resíduos têxteis reciclados e geomembranas de PEAD; imersão (8 meses) em água mineral sulfurosa; imersão em laboratório a 20 °C (água estática) e no local de captação a 37 °C (água corrente). |
| Müller-Rochholz <i>et al.</i> [103] | 2008 | Geogrelhas de PET; imersão em Ca(OH) <sub>2</sub> (pH 12,5) a 50 °C, 60 °C, 70 °C e 90 °C; imersão a 50 °C durante mais de 4 anos.  |
| Jailloux <i>et al.</i> [104]        | 2008 | Fios de PET; imersão em várias soluções durante 80 dias a 95 °C; exposição em diferentes meios a 23 °C e a 50 °C durante 10 anos.   |
| Derombise <i>et al.</i> [105]       | 2008 | Geotêxteis de aramida; imersão em Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (pH 9 e pH 11) a 20°C, 40 °C, 60 °C e 80 °C; período máximo de imersão de 231 dias.   |

### 3.5.3 - Resistência às alterações de temperatura

As variações da temperatura podem provocar a expansão ou a contracção dos materiais poliméricos. O CEN TC 189 possui um método para determinar a resistência das barreiras geossintéticas a ciclos de gelo-degelo (CEN/TS 14418:2005). Por sua vez, a comissão D35 da ASTM desenvolveu um método para avaliar o efeito da temperatura na estabilidade dos geossintéticos - ASTM D4594-96(2009).

Existem outros métodos (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser adaptados para determinar o efeito da temperatura nos geossintéticos. A comissão D20 da ASTM (Plásticos) desenvolveu métodos para avaliar as alterações (causadas pela temperatura) nas dimensões de plásticos (ASTM D1042-06 e ASTM D1204-08). Por sua vez, a comissão D13 da ASTM (Têxteis) desenvolveu métodos para avaliar o encolhimento de fios e de fibras: ASTM D2102-02(2007) (fibras) e ASTM D2259-02(2006)e1 (fios).

A ISO TC 61 (Plásticos) possui um método para determinar as alterações nas dimensões de plásticos expostos a aquecimento - ISO 11501:1995; o CEN indica um método idêntico (EN ISO 11501:2004).

### 3.5.4 - Resistência à oxidação

A resistência dos geossintéticos à termo-oxidação pode ser avaliada de acordo com a norma EN ISO 13438:2004 (norma desenvolvida pelo CEN TC 189). Esta norma descreve dois tipos de ensaios muito distintos: ensaios pelo método do forno (A1, A2, B1 e B2) e ensaios num autoclave com alta pressão de oxigénio (C1 e C2). As principais características dos diferentes ensaios encontram-se resumidas no Quadro 3.4.

Os métodos A e B são baseados no envelhecimento dos geossintéticos pela exposição a temperaturas elevadas numa atmosfera normal de oxigénio (21% de O<sub>2</sub>, forno com circulação de ar); o aumento da temperatura é o único factor de aceleração do processo de oxidação (informação adicional sobre o método do forno pode ser encontrada no Capítulo 7).

Quadro 3.4 - Métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos à oxidação (EN ISO 13438:2004).

| Método | Equipamento                             | Polímero (aplicação)      | Temperatura | Tempo   |
|--------|---|---------------------------|-------------|---------|
| A1     | Forno                                   | PP (excepto reforço)      | 110 °C      | 14 dias |
| A2     |   | PP (reforço)              | 110 °C      | 28 dias |
| B1     |   | PE (excepto reforço)      | 100 °C      | 28 dias |
| B2     |   | PE (reforço)              | 100 °C      | 56 dias |
| C1     | Autoclave<br>(5 MPa de O <sub>2</sub> ) | PP e PE (excepto reforço) | 80 °C       | 14 dias |
| C2     |   | PP e PE (reforço)         | 80 °C       | 28 dias |

No método C, o envelhecimento dos geossintéticos ocorre pela exposição a temperaturas e pressões elevadas de oxigénio (5 MPa de O<sub>2</sub> a 80 °C) em meio líquido (solução aquosa de NaHCO<sub>3</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>, ajustada para pH 10 com NaOH 1 mol.L<sup>-1</sup>). Este método tem vindo a ser desenvolvido na Alemanha no *Federal Institute for Materials Research and Testing* (Figura 3.24) [106-109].

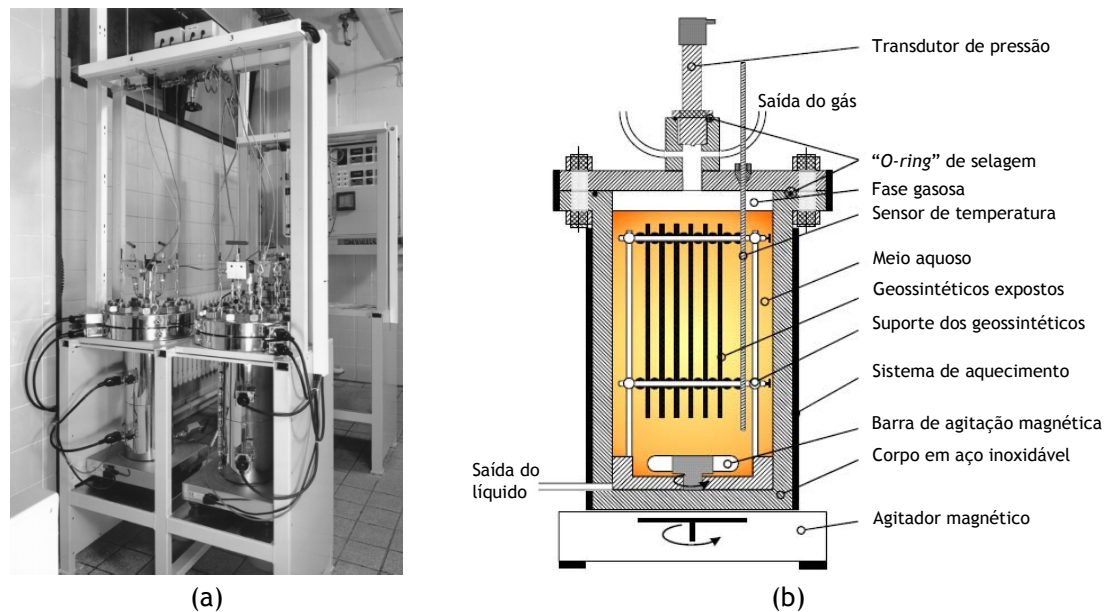


Figura 3.24 - Equipamento desenvolvido no *Federal Institute for Materials Research and Testing* para expor os geossintéticos a pressões elevadas de oxigénio: (a) dois autoclaves [106]; (b) esquema de um autoclave (adaptado de [108]).

As principais vantagens do método C incluem [107]: capacidade de manter a superfície dos provetes à temperatura pretendida; estudar o impacto do meio líquido (e da sua composição) no processo de oxidação; possibilidade de aceleração do processo de oxidação através de reacções de hidrólise e da extracção de componentes dos geossintéticos; aceleração do processo global de degradação através da saturação da reacção de oxidação com oxigénio. A combinação de todos os efeitos de aceleração permite realizar o ensaio a temperaturas inferiores às usadas no método do forno; isto é importante porque as altas temperaturas podem ter efeitos indesejáveis nas propriedades físicas e/ou químicas de alguns geossintéticos e podem inibir a actuação de alguns antioxidantes.

A resistência das barreiras geossintéticas à oxidação pode ser determinada de acordo com a norma EN 14575:2005 (norma com origem no CEN TC 189). A comissão D35 da ASTM também desenvolveu métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos à oxidação: ASTM D5721-08 (método do forno; geomembranas de poliolefinas) e a ASTM D5885-06 (determinação do tempo de indução da oxidação a pressão elevada; geossintéticos de poliolefinas).

A determinação do tempo de indução da oxidação (OIT) por calorimetria diferencial de varrimento (DSC) é um procedimento muito usado para avaliar a resistência dos plásticos à oxidação. O OIT de um plástico corresponde ao período de tempo necessário (a uma temperatura específica) para a sua degradação exotérmica numa atmosfera aeróbia (ar ou 100% de oxigénio). A ocorrência da oxidação é indicada por um aumento abrupto no calor desenvolvido pela amostra (Figura 3.25) [71].

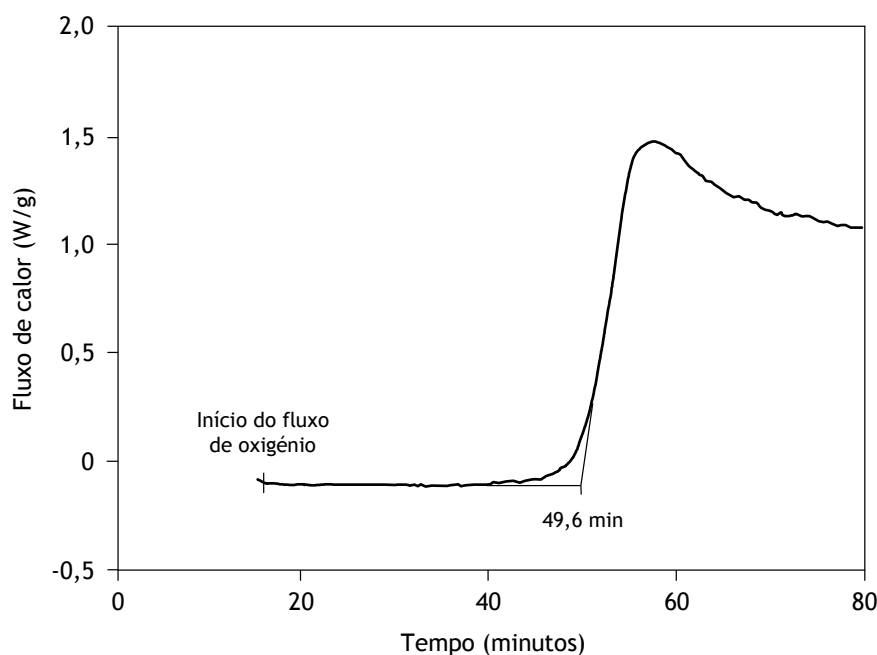


Figura 3.25 - Curva de DSC de um filme de PE (OIT - 49,6 minutos) (adaptado de [71]).

A determinação do OIT é muitas vezes utilizada para controlo de qualidade do grau de estabilização dos plásticos. A análise por DSC não permite identificar os antioxidantes presentes num plástico. No entanto, por vezes, podem ser estabelecidas relações quantitativas entre o OIT e a concentração de alguns antioxidantes [71].

O OIT pode ser determinado por dois métodos: (1) OIT normal (ASTM D3895-07) e (2) OIT a pressão elevada (HP-OIT) (ASTM D5885-06). O OIT normal (200 °C, 35 kPa) permite normalmente monitorizar os antioxidantes fenólicos, mas não é adequado para monitorizar fosfitos e HALS. O HP-OIT (150 °C, 3500 kPa) permite monitorizar mais antioxidantes do que o OIT normal [71].

A determinação do OIT é bastante usada devido à simplicidade e rapidez do ensaio (menos de uma hora na maioria dos casos). No entanto, a previsão do tempo de vida dos materiais poliméricos com base no OIT tem que ser feita com muito cuidado; em muitos casos, não há uma correlação entre o OIT e o desempenho dos materiais em campo.

Neste trabalho, foram desenvolvidos um novo equipamento (um protótipo) e um novo método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. No novo método, a oxidação dos materiais ocorre em meio líquido (em peróxido de hidrogénio), a 80 °C e com pressão de oxigénio elevada (a pressão de oxigénio é obtida pela decomposição do peróxido de hidrogénio); a descrição detalhada do novo equipamento e método pode ser encontrada no Capítulo 8.

O Quadro 3.5 resume as principais características dos estudos encontrados na literatura relativos à avaliação da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.

Quadro 3.5 - Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.

| Autores                       | Ano  | Principais características do estudo  |
|-------------------------------|------|---|
| Hsuan e Guan [110]            | 1998 | Geomembranas de PEAD; método do forno a várias temperaturas (65 °C, 75 °C, 95 °C e 110 °C); determinação do OIT e do HP-OIT por DSC.  |
| Vink e Fontijn [111]          | 2000 | Fitas de PP; método com elevada pressão de O <sub>2</sub> (diferentes pressões) - exposição a 100 °C em meio gasoso; método do forno a 100 °C.  |
| Maubeuge e Ehrenberg [112]    | 2000 | Geotêxteis de PE e de PP; exposição pelo método do forno (EN ISO 13438:2004).   |
| Mueller e Jakob [113]         | 2000 | Geotêxteis de PE e de PP e geomembranas de PEAD; método do forno; determinação do OIT por DSC (ASTM D3895-07).  |
| Schroeder <i>et al.</i> [106] | 2000 | Geossintéticos de PP e de PEAD; método com elevada pressão de O <sub>2</sub> (5 MPa) em meio líquido (NaHCO <sub>3</sub> , pH 10), a 80 °C.   |
| Santos <i>et al.</i> [96]     | 2002 | Geotêxteis de PP e de PET; método do forno; atmosfera normal de O <sub>2</sub> sem circulação de ar; EN ISO 13438:2004.   |
| Schroeder <i>et al.</i> [107] | 2002 | Fitas de PP e geomembrana de PEAD; método com elevada pressão de O <sub>2</sub> (5 MPa) em meio líquido (NaHCO <sub>3</sub> , pH 10), a 80 °C.  |
| Mueller e Jakob [114]         | 2003 | Geomembranas de PEAD; método do forno com atmosfera normal de O <sub>2</sub> a 80 °C; exposição durante mais de 13 anos; determinação do OIT por DSC (ASTM D3895-07).   |
| Mueller <i>et al.</i> [115]   | 2003 | Geotêxteis não-tecidos de PE e de PP; método do forno; circulação forçada de ar; determinação do OIT por DSC (ASTM D3895-07).   |
| Li e Hsuan [116]              | 2004 | Fitas de PP; exposição pelo método do forno (35 °C, 45 °C, 55 °C e 65 °C) em ar (a pressão normal e a pressão elevada) e numa atmosfera enriquecida com O <sub>2</sub> ; determinação do HP-OIT por DSC (ASTM D5885-06).                                  |
| Astruc <i>et al.</i> [117]    | 2004 | Fibras de PP; exposição a 80 °C com pressão de O <sub>2</sub> de 5 MPa em meio gasoso e em meio líquido (em água e numa solução de NaHCO <sub>3</sub> , pH 10); exposição pelo método do forno a 110 °C, 130 °C e a 140 °C; análise das amostras por DSC. |

(o Quadro 3.5 continua na página seguinte)

(continuação do Quadro 3.5)

|                                |      |   |
|--------------------------------|------|---|
| Bartolomeo <i>et al.</i> [118] | 2004 | Geotêxtil e geomembrana de PP; exposição pelo método do forno (110 °C, 130 °C, 140 °C); exposição a 80 °C com pressão de O <sub>2</sub> de 5 MPa em meio gasoso e em meio líquido (água e numa solução de NaHCO <sub>3</sub> , pH 10); determinação do OIT por DSC (ASTM D3895-07). |
| Lodi e Bueno [119]             | 2004 | Geomembranas de PEAD e de PVC; método do forno a 85 °C; tempo de exposição máximo de 30 meses; determinação do OIT por DSC (ASTM D3895-07).   |
| Richaud <i>et al.</i> [120]    | 2006 | Fibras de PP; exposição pelo método do forno a 80 °C e a 130 °C; exposição a 80 °C com elevada pressão de O <sub>2</sub> (5 MPa) em meio gasoso e numa solução de NaHCO <sub>3</sub> , pH 10.   |
| Carneiro <i>et al.</i> [121]   | 2006 | Geotêxteis não-tecidos de PP; método do forno a 110 °C; atmosfera normal de O <sub>2</sub> sem circulação de ar.  |
| Richaud <i>et al.</i> [122]    | 2008 | Fibras de PP; exposição pelo método do forno (sem ventilação) a 80 °C e a 130 °C; exposição a 80 °C com pressões de O <sub>2</sub> de 5 MPa em meio gasoso e em meio líquido (em água e numa solução de NaHCO <sub>3</sub> , pH 10); análise por DSC.                               |
| Carneiro <i>et al.</i> [123]   | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PP; exposição em meio líquido (peróxido de hidrogénio), a 80 °C e com uma pressão de O <sub>2</sub> de 35-40 bar; método do forno a 80 °C e a 110 °C.   |
| Boehning <i>et al.</i> [108]   | 2008 | Fitas de PP; método com elevada pressão de O <sub>2</sub> (1,1 MPa, 2,1 MPa e 5,1 MPa) em meio líquido (NaHCO <sub>3</sub> , pH 10), a diferentes temperaturas (60 °C, 70 °C e 80 °C; método do forno a 110 °C; determinação do HP-OIT por DSC.                                     |
| Retzlaff <i>et al.</i> [109]   | 2008 | Aspectos gerais do método com elevada pressão de O <sub>2</sub> .   |
| Carneiro <i>et al.</i> [124]   | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PP; método do forno a 80 °C, 90 °C, 100 °C e 110 °C; atmosfera normal de O <sub>2</sub> sem circulação de ar.   |
| Thomas e Maubeuge [125]        | 2008 | Geotêxtil de PP; método do forno a diferentes temperaturas; atmosfera com 8% de O <sub>2</sub> , 21% de O <sub>2</sub> (circulação forçada do ar) ou 100% de O <sub>2</sub> ; tempos de exposição até 504 dias.   |

### 3.5.5 - Resistência aos agentes climáticos simulados em laboratório

#### 3.5.5.1 - Considerações iniciais

A resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos pode ser avaliada por ensaios laboratoriais (usando fontes de luz artificiais e temperaturas elevadas) ou através da exposição dos materiais sob condições reais. Os ensaios de exposição real são normalmente muito longos (alguns meses ou vários anos), sendo inexecutáveis na maioria dos casos (o que levou à necessidade de desenvolver métodos laboratoriais acelerados).

Os simuladores climáticos são usados para tentar reproduzir (num curto intervalo de tempo - dias ou semanas) os danos ocorridos, a longo prazo (meses ou anos), nos materiais expostos ao ar livre. O equipamento laboratorial deve ser capaz de simular fielmente (e rapidamente) a degradação sofrida pelos materiais quando expostos sob condições reais.

Os simuladores climáticos possuem uma câmara de ensaio onde os geossintéticos são introduzidos e expostos (a temperatura elevada) à radiação UV artificial. A chuva e a humidade são normalmente simuladas através da pulverização com água e/ou através da condensação de água na superfície dos geossintéticos. De um modo geral, os métodos artificiais de envelhecimento climático intercalam períodos de luz e de escuridão (para simular os ciclos diários do sol), bem como períodos com e sem chuva.

As principais vantagens dos métodos artificiais de envelhecimento climático englobam: condições de ensaio estáveis e controláveis (as condições ao ar livre são altamente variáveis e não podem ser controladas); ambiente limpo - as possíveis contaminações podem ser eliminadas ou controladas (as amostras ao ar livre ficam contaminadas e muitas vezes inadequadas para análise instrumental); os resultados são obtidos num curto intervalo de tempo; facilmente reproduzível.

A maior dificuldade dos métodos artificiais consiste em extrapolar a informação laboratorial para a degradação que irá ocorrer sob condições reais (a obtenção de uma boa relação entre a degradação acelerada em laboratório e a degradação ao ar livre é, em muitos casos, complicada). No entanto, os simuladores laboratoriais podem ser muito úteis para o controlo de qualidade dos geossintéticos e para determinar a melhor composição (antioxidantes e estabilizantes UV) para os materiais.

Nos pontos seguintes, procede-se a uma breve descrição dos simuladores climáticos mais comuns, bem como das fontes de luz utilizadas nesses equipamentos. Serão, também, apresentados os vários métodos laboratoriais para avaliar a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos. Por fim, serão descritas as principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação laboratorial da resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos.

#### **3.5.5.2 - Tipos de simuladores climáticos [56]**

Os equipamentos disponíveis para simular o efeito da exposição prolongada aos agentes climáticos são geralmente classificados de acordo com as fontes de luz usadas. Os equipamentos mais comuns incluem o simulador de arco de carbono, o simulador de arco de xénon e o simulador com lâmpadas fluorescentes.

O simulador de arco de carbono é uma tecnologia relativamente antiga. No entanto, ainda está em uso para testar materiais de acordo com algumas normas desenvolvidas para esse equipamento.

O simulador de arco de xénon utiliza uma lâmpada de xénon (equipada com filtros adequados) como fonte de luz. As maiores limitações deste simulador são os elevados custos iniciais e de manutenção; para manter o espectro de emissão estável e reproduzível é necessário substituir periodicamente as lâmpadas de xénon e os filtros.

O simulador com lâmpadas fluorescentes possui um custo inicial baixo (comparado com o simulador de arco de xénon) e é económico em termos de manutenção (necessita apenas de uma substituição periódica das lâmpadas fluorescentes). A descrição de um equipamento deste tipo (o QUV) pode ser encontrada no ponto 9.2.

### 3.5.5.3 - Fontes de luz [56, 58]

As fontes de luz mais usadas nos simuladores climatéricos incluem as lâmpadas de arco de carbono, as lâmpadas de arco de xénon e as lâmpadas fluorescentes. Existem ainda outros tipos de lâmpadas, menos usadas, como as lâmpadas de haleto metálico ou as lâmpadas de mercúrio.

As lâmpadas de arco de carbono são a fonte mais antiga de radiação UV; surgiram em 1918 e, ainda hoje, são especificadas em alguns métodos de ensaio. A radiação emitida pelas lâmpadas de arco de carbono é muito diferente do espectro solar. Assim, não permitem uma boa simulação da radiação solar.

As lâmpadas de arco de xénon permitem uma excelente simulação da radiação solar (não só na zona UV, como também na zona visível) (Figura 3.26); são provavelmente as lâmpadas mais usadas para a simulação dos danos provocados pela luz solar. O espectro de emissão das lâmpadas de xénon pode ser corrigido com filtros de radiação (para eliminar a radiação UV abaixo dos 295 nm e para eliminar o excesso de radiação infravermelha).

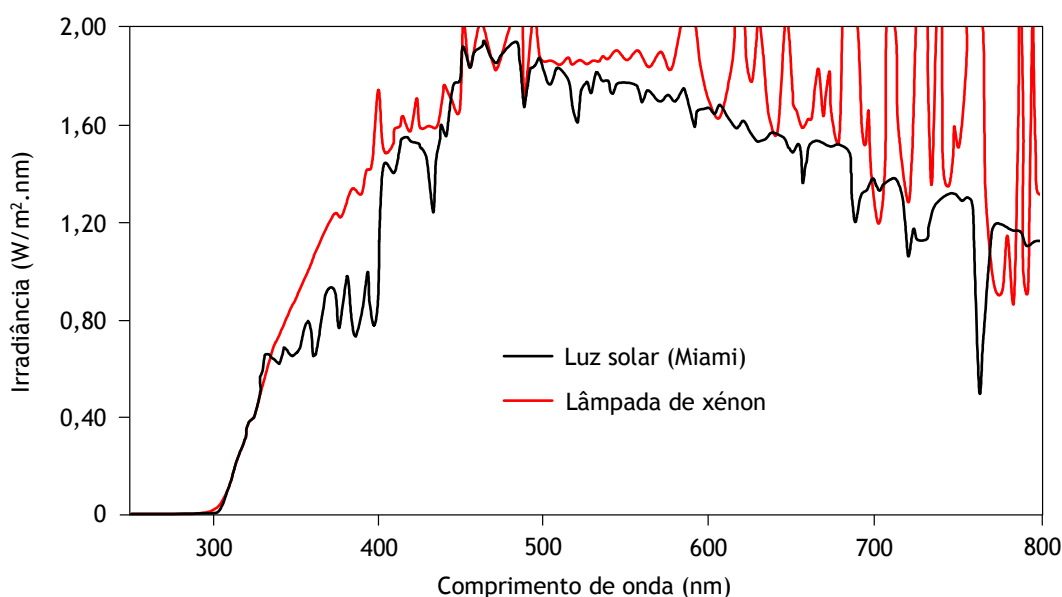


Figura 3.26 - Comparação do espectro das lâmpadas de xénon (equipadas com filtros adequados) com o espectro da luz solar (pico de radiação solar em Miami - Estados Unidos) (adaptado de [58]).

As lâmpadas FS-40 foram as primeiras lâmpadas fluorescentes usadas em simuladores climatéricos (foram introduzidas nos anos 70). Mais tarde, em 1984, surgiram as lâmpadas UVB-313 (uma segunda geração das lâmpadas FS 40). As lâmpadas UVA-340 foram introduzidas em 1987 para fornecer uma melhor correlação com a radiação solar (Figura 3.27).

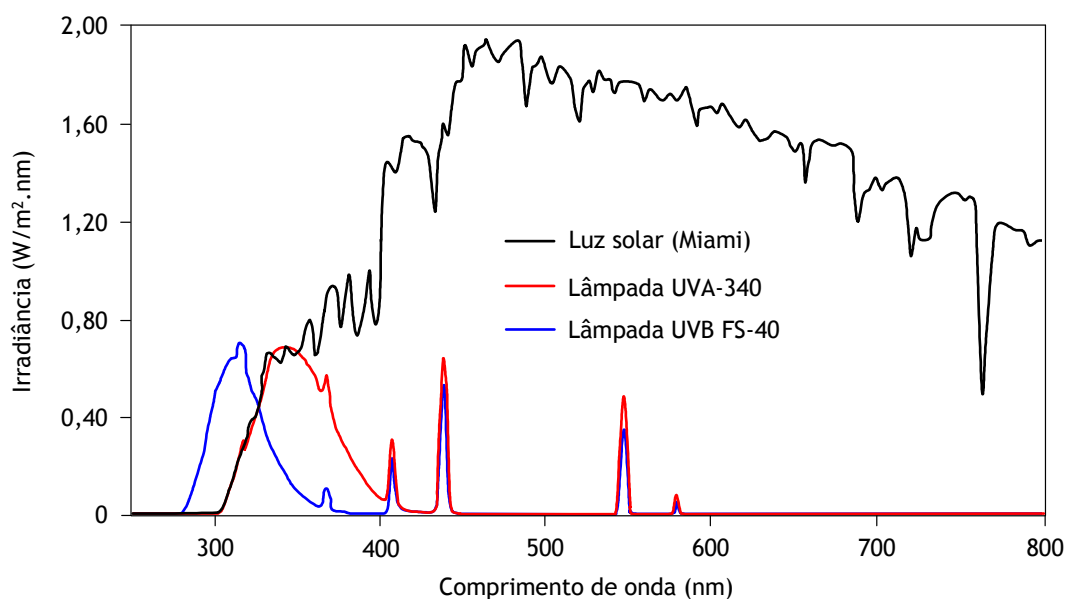


Figura 3.27 - Comparação do espectro das lâmpadas fluorescentes UVA-340 e UVB FS-40 com o espectro da luz solar (pico de radiação solar em Miami - Estados Unidos) (adaptado de [58]).

Os espectros de emissão das lâmpadas FS-40 e UVB-313 são muito diferentes do espectro solar; estas lâmpadas emitem radiação UV de alta energia inexistente na radiação solar. As lâmpadas UVA-340 permitem uma boa simulação da luz solar entre os 295 e 350 nm; a quantidade de radiação visível e infravermelha emitida por estas lâmpadas é muito baixa.

O facto das lâmpadas UVA-340 praticamente não emitirem radiação na zona visível ou infravermelha pode ter implicações negativas na qualidade dos resultados obtidos em laboratório. De facto, alguns pigmentos sofrem alterações de cor quanto expostos à radiação visível, dando origem a produtos de degradação que podem afectar o processo de foto-oxidação dos materiais. Deste modo, os materiais com pigmentos deste tipo podem sofrer danos ao ar livre que não ocorreram em laboratório durante a exposição num equipamento com lâmpadas fluorescentes.

Dependendo da cor, as amostras expostas ao ar livre ou num equipamento de arco de xénon sofrem degradação a diferentes temperaturas. A temperatura das amostras expostas num equipamento com lâmpadas fluorescentes apenas pode ser controlada através do aquecimento da câmara de ensaio (o que resulta na mesma temperatura para todas as amostras, independentemente da sua cor - o que não ocorre em situações reais).

#### 3.5.5.4 - Métodos normalizados de exposição aos agentes climáticos em laboratório

O CEN TC 189 desenvolveu um método laboratorial (equipamento com lâmpadas fluorescentes) para expor os geossintéticos ao envelhecimento climático - norma EN 12224:2000 (uma descrição deste método pode ser encontrada no ponto 9.3.5).

A exposição dos geossintéticos aos agentes climáticos pode também ser efectuada de acordo com as normas ASTM D4355-07 (para geotêxteis; equipamento de arco de xénon) e ASTM D7238-06 (para geomembranas; equipamento com lâmpadas fluorescentes); ambas as normas foram desenvolvidas pela comissão D35 da ASTM.



Existem ainda outros métodos (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser adoptados para avaliar a resistência dos geossintéticos ao envelhecimento climatérico. A comissão D20 da ASTM (Plásticos) desenvolveu um método (ASTM D5208-09) para a exposição de plásticos aos agentes climatéricos em laboratório (equipamento com lâmpadas fluorescentes).

A comissão G03 da ASTM (Envelhecimento climatérico e durabilidade) desenvolveu métodos para a exposição laboratorial de materiais não metálicos ao envelhecimento climatérico: G151-09 (práticas gerais de exposição), G152-06 e G153-04 (equipamento de arco de carbono), G154-06 (equipamento com lâmpadas fluorescentes) e G155-05a (equipamento de arco de xénon).

A ISO TC 61 (Plásticos) desenvolveu métodos para expor plásticos ao envelhecimento climatérico em laboratório: ISO 4892-1:1999 (guia geral de métodos de exposição em laboratório), ISO 4892-2:2006 (equipamento de arco de xénon), ISO 4892-3:2006 (equipamento com lâmpadas fluorescentes) e ISO 4892-4:2004 (equipamento de arco de carbono).

### 3.5.5.5 - Estudos existentes na literatura

A simulação laboratorial do envelhecimento climatérico dos geossintéticos é importante para prever o seu tempo de vida útil (principalmente nas aplicações em que os materiais podem estar expostos ao clima durante um longo período de tempo). No entanto, os estudos existentes na literatura sobre a resistência dos geossintéticos aos agentes climatéricos artificiais são escassos (Quadro 3.6).

Quadro 3.6 - Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação laboratorial da resistência dos geossintéticos aos agentes climatéricos.

| Autores                      | Ano  | Principais características do estudo   |
|------------------------------|------|--|
| Baker [126]                  | 1997 | Geotêxteis não-tecidos de PP; equipamento de arco de xénon.  |
| Bright <i>et al.</i> [127]   | 2004 | Geogrelhas; equipamento de arco de xénon (ASTM D4355-07); exposição máxima de 1000 horas.  |
| Matheus <i>et al.</i> [128]  | 2004 | Geotêxteis não-tecidos de PET e geomembranas de PEAD; equipamento de arco de xénon (ASTM D4355-07)   |
| Carneiro <i>et al.</i> [129] | 2005 | Geotêxteis não-tecidos de PP; equipamento com lâmpadas fluorescentes; exposição de 500 horas.  |
| Carneiro <i>et al.</i> [130] | 2006 | Geotêxteis não-tecidos de PP; equipamento com lâmpadas fluorescentes; exposição de 500 horas.  |
| Carneiro <i>et al.</i> [121] | 2006 | Geotêxteis não-tecidos de PP; equipamento com lâmpadas fluorescentes; exposição de acordo com a EN 12224:2000.   |
| Lodi <i>et al.</i> [131]     | 2008 | Geomembranas de PEAD e de PVC; equipamento com lâmpadas fluorescentes (ASTM G154-06); lâmpadas UVB; exposição máxima de 6 meses.                                   |
| Heindl <i>et al.</i> [132]   | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PP; equipamento de arco de xénon e equipamento com lâmpadas fluorescentes (UVA-340); 50 dias de exposição de acordo com a EN 12224:2000. |

### **3.5.6 - Resistência aos agentes climáticos reais**

#### **3.5.6.1 - Considerações iniciais**

Os simuladores climáticos são importantes para tentar reproduzir (num curto intervalo de tempo) os danos que ocorrem nos geossintéticos (e noutros materiais) durante meses ou anos de exposição ao ar livre. No entanto, ao ar livre existem alguns agentes de degradação (como o vento, as poeiras ou os poluentes atmosféricos) muito difíceis de simular em laboratório. Além disso, os mecanismos de degradação que ocorrem em laboratório podem não ser exactamente os mesmos que ocorrem ao ar livre.

Assim, e sempre que a obtenção de resultados não seja urgente, a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos deve ser avaliada através de uma exposição sob condições reais. Deste modo, é possível determinar com confiança o comportamento dos materiais quando expostos às condições de envelhecimento climáticas de um dado local.

As condições climáticas variam com o local de exposição, de ano para ano e durante as diferentes estações do ano. Assim, para interpretar os resultados obtidos ao ar livre, é importante monitorizar continuamente alguns parâmetros meteorológicos do local de exposição (tais como: a temperatura, a radiação incidente, a humidade, a precipitação ou a velocidade do vento). Desta forma, é possível comparar os resultados obtidos num dado local geográfico com resultados obtidos (para os mesmos materiais) noutros locais ou mesmo em simuladores laboratoriais.

Nos pontos seguintes, procede-se à descrição de algumas características dos ensaios de exposição ao ar livre, serão apresentados os métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos reais e serão descritas as principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a resistência dos geossintéticos ao envelhecimento climático sob condições reais.

#### **3.5.6.2 - Local de exposição** [57, 58, 133]

A *ATLAS - Material Testing Solutions* dispõe da maior selecção mundial de locais para a exposição de materiais aos agentes climáticos reais; possui instalações para exposição ao ar livre na China, no Japão, na Coreia do Sul, na Índia, em Singapura, na Austrália, em França, na Holanda, na Rússia, no Canadá e nos Estados Unidos da América (as características particulares de alguns desses locais encontram-se resumidas no Quadro 3.7).

Os dois locais mais comuns para expor materiais poliméricos aos agentes climáticos são a Flórida (clima quente e molhado) e o Arizona (clima quente e seco), ambos nos Estados Unidos da América. Os climas destes locais são considerados os piores cenários a que os materiais podem estar expostos quando aplicados no hemisfério Norte. Assim, tornaram-se climas de referência internacional para a exposição de materiais poliméricos à acção dos agentes climáticos.

O clima de Miami (Flórida) possui uma temperatura média elevada (a rondar os 23 °C), alta radiação solar anual (cerca de 3000 horas de sol por ano), precipitação e humidade elevadas e um extenso período de molhado (cerca de 4200 horas anuais). Além disso, Miami possui um clima relativamente

estável de ano para ano. Deste modo, a estação de Miami é o local escolhido por muitas indústrias para expor materiais aos agentes climáticos. A Figura 3.28 mostra uma vista aérea da estação de exposição de Miami da *ATLAS - Material Testing Solutions*.

Quadro 3.7 - Principais características de alguns locais normalmente escolhidos para a exposição de materiais ao envelhecimento climático (dados obtidos em [133]).

| Estação de exposição       | Elevação (m) | Temperatura média (°C) | Radiação solar total anual ( $\text{MJ.m}^{-2}$ ) | Humidade relativa média (%) | Precipitação total anual (mm) |
|----------------------------|--------------|------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------|
| Miami (Flórida)            | 3            | 23                     | 6588  | 78                          | 1685                          |
| Jacksonville (Flórida)     | 8            | 20                     | 5800  | 76                          | 1303                          |
| Phoenix (Arizona)          | 610          | 22                     | 8004  | 37                          | 255                           |
| Ottawa (Canadá)            | 103          | 6                      | 4050  | 73                          | 1910                          |
| Sanary sur Mer (França)    | 110          | 13                     | 5500  | 76                          | 700                           |
| Hoek van Holland (Holanda) | 6            | 10                     | 3800  | 87                          | 800                           |



Figura 3.28 - Estação de exposição de Miami da *ATLAS - Material Testing Solutions* [57].

A estação de Jacksonville (Flórida) combina um ambiente salino (a estação está localizada perto do oceano) com um ambiente industrial (com poluição atmosférica), para além de altas temperaturas e elevada humidade características da Flórida.

O clima de Phoenix (Arizona) é relativamente estável; possui cerca de 4000 horas de sol anuais, uma temperatura média próxima dos 22 °C (com temperaturas máximas durante um dia de Verão acima de 40 °C e com temperaturas mínimas nocturnas no Inverno abaixo de 0 °C), humidade reduzida, baixa precipitação anual e um período de molhado com cerca de 375 horas anuais.

A estação de Ottawa (Canadá) proporciona um clima frio (com uma temperatura média a rondar os 6 °C) e húmido, com muitos ciclos de gelo-degelo.

Na Europa, a estação de Sanary sur Mer (França) proporciona um clima tipicamente mediterrânico; possui aproximadamente 3000 horas de sol anuais, humidade elevada e um período de molhado com cerca de 2700 horas. Por sua vez, a estação de Hoek van Holland (Holanda) fornece um clima frio e muito húmido. Além disso, permite a combinação dos efeitos de um ambiente salino com os efeitos da poluição industrial (podendo ocorrer chuvas ácidas).

A *ATLAS - Material Testing Solutions* não opera nenhuma estação de exposição a elevada altitude; a mais alta é a estação de Prescott - Arizona (1531 metros). As estações localizadas a grande altitude podem permitir a exposição a concentrações elevadas de radiação UV. No entanto, as temperaturas são frias. Na Europa, a estação de Jungfrauoch na Suíça (altitude de 3580) possui um clima que pode ser útil para a exposição de muitos materiais.

### **3.5.6.3 - Tipos de exposição** [57, 58]

**Exposição directa:** neste método, os materiais são directamente expostos aos agentes climáticos; é o método normalmente usado em geossintéticos (Figura 3.29a).

**Exposição debaixo de vidro:** é um método muitas vezes utilizado para testar materiais destinados a aplicações de interior. Neste método, os materiais são colocados por detrás de uma janela de vidro (normalmente com 2,5 a 3,0 mm de espessura) que absorve a radiação inferior a 310 nm e transmite cerca de 77% da radiação UV e 85% da radiação visível. O vidro é normalmente pré-exposto durante 3 meses antes de ser usado (processo de solarização). A temperatura das amostras expostas é maior do que numa exposição directa. A Figura 3.29b ilustra uma exposição debaixo de vidro.

**Exposição em caixa negra:** neste método, as amostras são colocadas no interior de uma caixa negra (com o topo aberto); todos os espaços livres entre as amostras possuem cor negra (Figura 3.29c). Os métodos com caixas negras permitem normalmente acelerar a degradação dos materiais expostos (a temperatura das amostras é maior do que noutros tipos de exposição). A exposição em caixa negra pode também ser efectuada debaixo de vidro (para materiais de interior).

**Exposição com pulverização (*spray*):** neste método, as amostras são pulverizadas periodicamente com líquidos: na maioria dos casos, água destilada ou água salgada (5% de cloreto de sódio). O *spray* salino é normalmente usado para aumentar o grau de corrosão; a pulverização com água é utilizada para provocar alterações bruscas na temperatura da amostra (choque térmico e *stress* mecânico).

**Exposição com *sun-tracking*:** neste método, os expositores seguem o movimento do sol, de modo a maximizar a quantidade de energia radiante recebida pelas amostras (Figura 3.29d).

**Exposição com concentração de luz:** neste método, os expositores possuem meios (normalmente espelhos) para concentrar a luz solar na superfície das amostras expostas (provocando um aumento da temperatura das amostras). O expositor pode, ainda, seguir o movimento do sol para aumentar a quantidade de radiação solar fornecida às amostras.

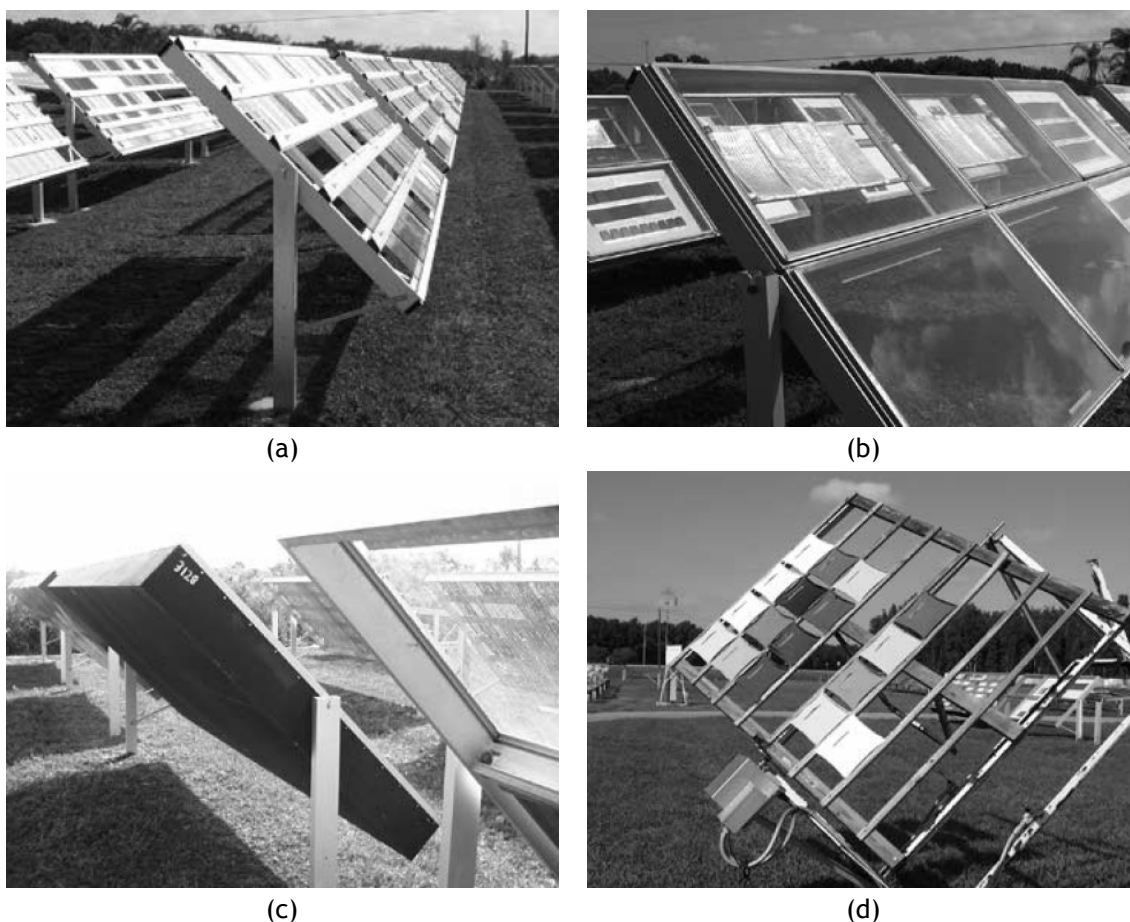


Figura 3.29 - Tipos de exposição aos agentes climáticos reais [58]: (a) exposição directa; (b) exposição debaixo de vidro; (c) exposição em caixa negra; (d) exposição com *sun-tracking*.

#### 3.5.6.4 - Ângulo de exposição [57, 58]

O ângulo de exposição influencia a energia radiante recebida pela amostra, a duração do período de molhado e a temperatura que a amostra vai atingir. Os ângulos de exposição mais comuns incluem:

**0° (horizontal):** a exposição a 0° provoca uma maior duração do período de molhado e uma maior acumulação de lixo nas amostras expostas. É usada, por exemplo, para testar materiais utilizados na construção de telhados.

**5°:** a exposição a 5° é preferível à exposição a 0°, dado que permite alguma drenagem e lavagem do lixo durante os períodos de chuva. No entanto, resulta numa maior duração do período de molhado quando comparada com exposições a ângulos superiores. O ângulo de 5° é usado, por exemplo, pela indústria automóvel para o teste de pinturas e de revestimentos.

**45°:** é provavelmente o ângulo de exposição mais usado. As amostras expostas a 45° possuem menor duração do período de molhado, menor retenção de lixo e, dependendo do período do ano, menor temperatura do que se estivessem expostas a 5°.

**90° (vertical):** a exposição a 90° reduz significativamente a duração do período de molhado e causa menores temperaturas nas amostras a testar. As exposições verticais são principalmente usadas para

testar alguns materiais de construção (por exemplo, revestimentos de paredes exteriores, portas ou janelas).

**Ângulo variável:** a variação periódica do ângulo de exposição permite a maximização da quantidade de energia radiante recebida pelas amostras (é utilizada para compensar as diferenças sazonais na posição do sol). Além disso, provoca normalmente um aumento da temperatura das amostras.

**Latitude do local de exposição:** nos locais com latitudes superiores a 35°, a radiação solar máxima é normalmente obtida usando um ângulo de exposição igual à latitude do local (para exposições com ângulo fixo). A norma ISO 887-1:2009 recomenda o uso de ângulos de exposição em 10° inferiores à latitude do local para maximizar a radiação solar recebida pelas amostras.

#### **3.5.6.5 - Orientação da exposição**

Os expositores fixos estão normalmente orientados para Sul (em locais de exposição no hemisfério Norte) ou para Norte (em locais de exposição no hemisfério Sul). Os expositores com *sun-tracking* possuem uma orientação variável (de acordo com a posição do sol).

#### **3.5.6.6 - Tempo de exposição**

O tempo de exposição aos agentes climáticos reais pode ser muito variável (normalmente é longo, vários meses ou alguns anos); depende das características dos materiais expostos, do clima do local de exposição e dos resultados (e objectivos) a atingir com o ensaio.

#### **3.5.6.7 - Métodos normalizados de exposição aos agentes climáticos reais**

O CEN TC 189 e a ISO TC 221 não desenvolveram nenhum método para a exposição de geossintéticos à acção dos agentes climáticos reais. A única norma existente para geossintéticos tem origem na comissão D35 da ASTM - norma ASTM D5970-09 (para geotêxteis). No entanto, existem outras normas (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser aplicadas aos geossintéticos.

A ISO TC 61 (Plásticos) desenvolveu métodos para a exposição de materiais aos agentes climáticos reais: a ISO 887-1:2009 (guia geral de métodos de exposição), a ISO 887-2:2009 (exposição directa e exposição debaixo de vidro) e a ISO 887-3:2009 (exposição com concentração de luz).

A comissão G03 da ASTM (Envelhecimento climático e durabilidade) também desenvolveu alguns métodos para a exposição de materiais não metálicos aos agentes climáticos reais: a ASTM G7-05 (exposição directa), a ASTM G24-05 (exposição debaixo de vidro) e a ASTM G90-05 (exposição com concentração de luz). Por fim, a comissão D20 da ASTM (Plásticos) também possui um método para a exposição ao clima (a ASTM D1435-05).

#### **3.5.6.8 - Estudos existentes na literatura**

Na literatura, existem alguns estudos sobre a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos reais (Quadro 3.8). Os longos tempos de exposição, geralmente necessários para ocorrer degradação significativa dos materiais expostos, são um obstáculo à realização de mais estudos deste tipo.

Quadro 3.8 - Principais características dos estudos encontrados na literatura sobre a avaliação da resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos reais.

| Autores                      | Ano  | Principais características do estudo  |
|------------------------------|------|---|
| Baker [126]                  | 1997 | Geotêxteis não-tecidos de PP; 12 meses de exposição.  |
| Grubb <i>et al.</i> [134]    | 1999 | Geotêxteis não-tecidos de PET; 12 meses de exposição no Peru (altitude de 3675 m); ângulo de exposição de 45°; orientação Norte; ASTM D5970-09.   |
| Grubb <i>et al.</i> [135]    | 2000 | Geotêxteis não-tecidos de PP e de PET; 12 meses de exposição no Peru (a 4600 m e a 1250 m de altitude) e nos Estados Unidos da América (a 315 m de altitude); ângulo de exposição de 45°; orientação Norte (no Peru) e orientação Sul (nos Estados Unidos da América); ASTM D5970-09. |
| Fayoux e Van Der Sype [136]  | 2000 | Geomembranas de PVC após vários anos de operação (máximo 18 anos).  |
| Lee <i>et al.</i> [137]      | 2000 | Geotêxteis não-tecidos agulhados de PP; 14 meses de exposição na Coreia do Sul.   |
| Dierickx <i>et al.</i> [138] | 2004 | Agrotêxteis de PE e de PET; 5 anos de exposição; exposição vertical.  |
| Lopes e Barroso [139]        | 2004 | Geomembranas de PEAD; 5 anos de exposição em Portugal.  |
| Bright <i>et al.</i> [127]   | 2004 | Geogrelhas; 11 anos de exposição nos Estados Unidos da América; ângulo de exposição de 45°; orientação Sul.   |
| Carneiro <i>et al.</i> [140] | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PP; 2 anos de exposição em Portugal; ângulo de exposição de 30°; orientação Sul.  |
| Lodi <i>et al.</i> [131]     | 2008 | Geomembranas de PEAD e de PVC; 30 meses de exposição no Brasil; ASTM D1435-05 e ASTM D5970-09.  |
| Lodi e Bueno [141]           | 2008 | Geomembranas de PEAD; 7 anos de exposição no Brasil; ângulo de exposição de 45°; ASTM D1435-05 e ASTM D5970-09.   |
| Lodi <i>et al.</i> [142]     | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PET; 2 meses de exposição no Brasil; ASTM D1435-05 e ASTM D5970-09  |
| Benjamim <i>et al.</i> [143] | 2008 | Muro reforçado com geotêxteis de PP e de PET; 250 (PET) e 1000 (PP) dias de exposição no Brasil; exposição vertical.  |
| Heindl <i>et al.</i> [132]   | 2008 | Geotêxteis não-tecidos de PP; exposição na Alemanha (214 dias), na Holanda (212 dias) e em França (163 dias); ângulo de exposição de 45°; orientação Sul.   |
| Carneiro <i>et al.</i> [144] | 2009 | Geotêxteis não-tecidos de PP, georredes de PEAD e geomembranas de PEAD; exposição máxima de 2 anos em Portugal; ângulo de exposição de 30°; orientação Sul.   |

### 3.5.7 - Resistência aos microrganismos

O ataque dos microrganismos aos plásticos não pode ser acelerado de forma substancial. O aumento da temperatura (maneira de acelerar a maioria dos processos de degradação dos geossintéticos) não pode ser usado para acelerar a degradação biológica dos materiais (iria destruir os microrganismos e inibir o processo de degradação). A degradação microbiológica pode ser acelerada pela manutenção das condições óptimas de luz, de temperatura e de humidade para a actividade dos microrganismos.

Os geossintéticos podem ser expostos à actividade microbiológica *in situ* (sob condições reais) ou em laboratório. A norma EN 12225:2000 (CEN TC 189) descreve um método laboratorial para avaliar a resistência dos geossintéticos à degradação biológica. Neste método, os materiais são enterrados num solo biologicamente activo (com humidade e temperatura controladas). O nível da actividade biológica do solo é avaliado através da exposição de fibras de algodão (sem nenhum tratamento) às condições do ensaio (as fibras de algodão tem de sofrer degradação num dado intervalo de tempo; caso contrário, a actividade biológica do solo não é a ideal). A norma EN ISO 13437:1998 (também com origem no CEN TC 189) descreve um método para a instalação e extracção de geossintéticos no solo.

A norma ASTM D1987-07 (comissão D35) descreve um método para avaliar o grau de colmatção dos geotêxteis (usados em funções de filtragem ou de drenagem) provocado pelo crescimento biológico (formação de biomassa). Para além dos métodos das comissões técnicas dos geossintéticos, existem ainda outros métodos (desenvolvidos por outras comissões técnicas) que podem ser adaptados para os geossintéticos.

A comissão G03 da ASTM (Envelhecimento climatérico e durabilidade) desenvolveu alguns métodos para determinar a resistência de materiais aos microrganismos: ASTM G21-96(2002) (determinação da resistência de polímeros sintéticos a fungos), ASTM G29-96(2002) (determinação da resistência de plásticos a algas) e ASTM G160-03(2009) (determinação da resistência de materiais não metálicos à degradação microbiológica - materiais enterrados em laboratório). Por sua vez, a ISO 846:1997 (ISO TC 61 - Plásticos) descreve um método para avaliar a resistência dos plásticos aos microrganismos.

A maioria dos polímeros usados para o fabrico dos geossintéticos possui uma excelente resistência à degradação biológica; talvez por este motivo, na literatura, são muito escassos os estudos acerca da resistência dos geossintéticos aos microrganismos. Neste trabalho, procedeu-se à avaliação *in situ* da resistência dos geotêxteis de PP aos agentes do solo (Capítulo 11).

### 3.5.8 - Resistência a outros agentes de degradação

**Animais e raízes:** a especificação técnica CEN/TS 14416:2005 (CEN TC 189) possui um método para determinar a resistência das barreiras geossintéticas a raízes. Não existem métodos específicos para simular o ataque por animais (como por exemplo, roedores) aos geossintéticos.

**Radioactividade e fogo:** actualmente, não existem quaisquer métodos específicos para determinar a resistência dos geossintéticos à radioactividade ou ao fogo.



**Fissuração por tensão ambiental:** a norma EN 14576:2005 (CEN TC 189) descreve um método para a determinação da resistência das barreiras geossintéticas à ESC. A comissão D35 da ASTM possui uma norma (ASTM D5397-07) para avaliar a resistência das geomembranas de poliolefinas à fissuração por tensão. Existem ainda outras normas (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser adoptadas para determinar o efeito da ESC nos geossintéticos: a norma ISO 22088:2006 (norma dividida em 6 partes com origem na ISO TC 61 - Plásticos) resume vários métodos para avaliar a resistência dos plásticos à ESC; por sua vez, a norma ASTM D1693-08 (comissão D20 da ASTM - Plásticos) descreve um método para avaliar a resistência à ESC dos plásticos de etileno. De um modo geral, a ESC não constitui um problema para os geotêxteis. Assim, não foram desenvolvidos métodos para determinar a resistência destes materiais à ESC.

**Cargas estáticas, cargas dinâmicas e abrasão:** as comissões CEN TC 189 e ASTM D35 desenvolveram alguns métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos a cargas estáticas, a cargas dinâmicas e à abrasão. As normas EN ISO 13431:1999 e ASTM D5262-07 permitem avaliar a fluência e a rotura em fluência dos geossintéticos. As cargas dinâmicas que actuam sobre os materiais durante os processos de instalação em obra podem ser simuladas segundo a EN ISO 10722:2007. Por fim, a resistência dos geossintéticos à abrasão pode ser determinada de acordo com as normas EN ISO 13427:1998 e ASTM D4886-88(2002).

### **3.6 - Algumas técnicas usadas para avaliar a danificação sofrida pelos geossintéticos**

#### **3.6.1 - Considerações iniciais**

A danificação sofrida pelos geossintéticos durante os vários ensaios de durabilidade é normalmente determinada com base nas alterações ocorridas nas propriedades e/ou características dos materiais; os métodos usados, neste trabalho, para avaliar os danos sofridos pelos geossintéticos (nos diversos ensaios de durabilidade realizados) encontram-se descritos no Capítulo 4 e nos pontos 12.3 e 13.3.

Nos pontos seguintes, procede-se a breve descrição dos fundamentos teóricos de algumas técnicas analíticas utilizadas (na execução experimental do trabalho) para avaliar a degradação sofrida pelos geossintéticos (microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X; espectroscopia de infravermelho) e para determinar o teor do aditivo C944 nos geotêxteis de PP (cromatografia líquida de alta eficiência).

#### **3.6.2 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X [145]**

##### **3.6.2.1 - Aspectos gerais**

Os microscópios electrónicos permitem a observação e a caracterização de materiais com base nas interacções existentes entre a superfície da amostra e um feixe de electrões; a Figura 3.30 ilustra a estrutura e o modo de funcionamento de um microscópio electrónico de varrimento.

A microscopia electrónica de varrimento (MEV) permite obter imagens através de um varrimento da superfície da amostra com um feixe electrónico. A detecção dos sinais resultantes da interacção do

feixe electrónico com a superfície da amostra permite obter imagens com informação de topografia, da composição química (número atómico) e da composição elementar (desde que esteja associado um espectrómetro de raio X ao microscópio).

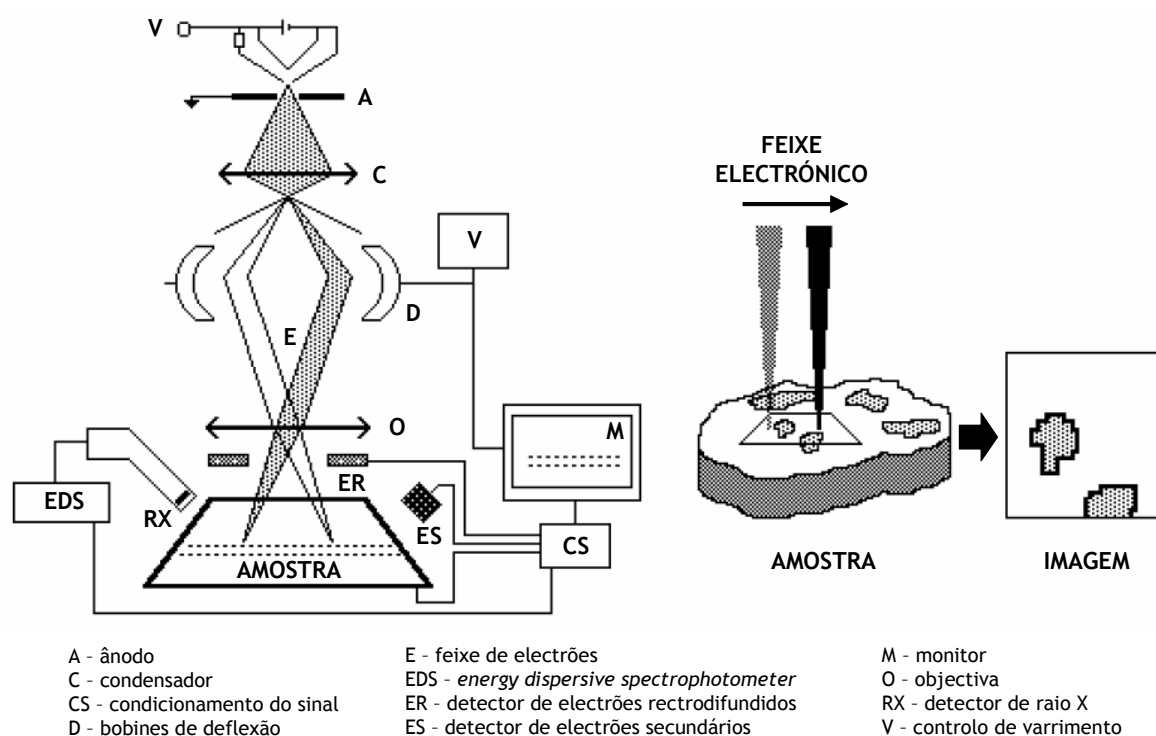


Figura 3.30 - Estrutura e modo de funcionamento de um microscópio electrónico de varrimento (adaptado de [145]).

Muitos microscópios electrónicos de varrimento possuem uma unidade de detecção de raio X, o que permite determinar, de forma qualitativa ou mesmo quantitativa, a composição elementar local das amostras (para uma gama de elementos desde o carbono até ao urânio; resolução espacial da ordem de 1  $\mu\text{m}$ ). As potencialidades da microscopia electrónica aumentam muito significativamente com a introdução de uma unidade de detecção por raio X.

### 3.6.2.2 - Características das amostras

As amostras a analisar por MEV devem apresentar algumas características indispensáveis: devem ser estáveis em condições de alto-vácuo (pressões próximas dos  $10^{-4}$  Pa), devem possuir condutividade eléctrica à superfície e devem ser muito estáveis aquando da interacção com o feixe de electrões. As amostras são normalmente montadas rigidamente num suporte e ligadas electricamente à terra (para evitar a acumulação de cargas electrostáticas na sua superfície).

As amostras metálicas (condutoras) não precisam de grande preparação para poderem ser analisadas por MEV; apenas operações de limpeza (quando aplicável) e de montagem no suporte. Por sua vez, as amostras não condutoras acumulam carga eléctrica quando atingidas pelo feixe de electrões, o que impede a correcta obtenção de imagens; para poderem ser observadas por MEV, estas amostras têm de ser revestidas com uma camada ultra-fina de um material condutor (normalmente, ouro).

### 3.6.2.3 - Interações entre o feixe electrónico e a amostra

As interações entre o feixe de electrões incidente (com energia que pode atingir algumas dezenas de KeV) e a amostra podem ser: (1) elásticas (provocando alterações na direcção da trajectória dos electrões primários) ou (2) não-elásticas (originando perdas de energia e mudanças na direcção da trajectória dos electrões primários). As interações mais importantes entre o feixe de electrões e as amostras envolvem a emissão de electrões secundários, a emissão de electrões rectrodifundidos e a emissão de raios X (Figura 3.31). A detecção destes sinais é conseguida com detectores específicos (normalmente, todos presentes num único equipamento de microscopia electrónica).

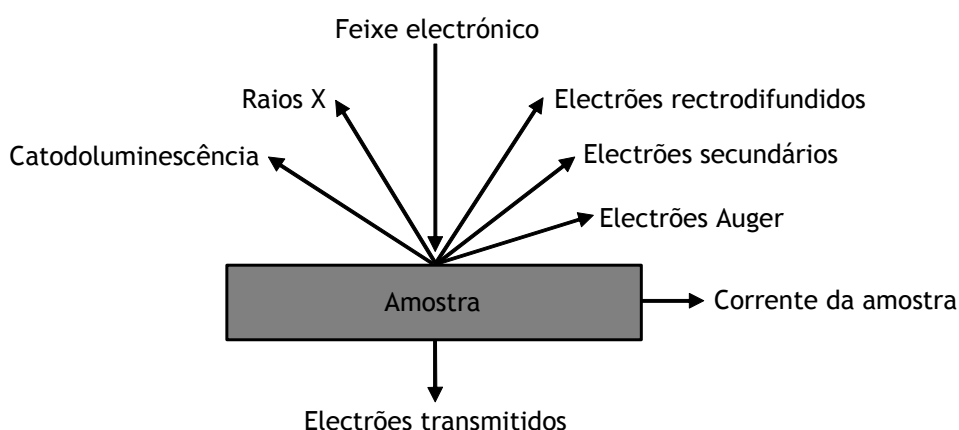


Figura 3.31 - Resultados da interacção do feixe electrónico com a amostra (adaptado de [145]).

**Electrões secundários:** são electrões de baixa energia (menor que 50 eV) emitidos da superfície da amostra; os electrões secundários provêm da vizinhança do local de impacto do feixe electrónico e de uma profundidade que não ultrapassa algumas dezenas de nm. A imagem obtida por detecção de electrões secundários tem um forte contraste topográfico; o relevo que se observa nas imagens de electrões secundários é idêntico ao aspecto que a superfície teria numa observação visual directa ou com uma lupa.

**Electrões rectrodifundidos:** são electrões com energia elevada (próxima da energia dos electrões primários). A emissão de electrões rectrodifundidos resulta de interações elásticas ou com baixas perdas de energia. A intensidade da emissão de electrões rectrodifundidos é dependente do número atómico do material (o grau de rectrodifusão aumenta com o aumento do número atómico). Assim, numa imagem de electrões rectrodifundidos o contraste de cor informa sobre o número atómico (as zonas com maior número atómico possuem uma cor mais clara).

**Raios X:** a radiação incidente (muito energética) pode interagir com os electrões do cerne atómico, que abandonam os níveis de energia originais (para níveis de energia superiores ou mesmo para fora do átomo). Após a excitação, o vazio deixado no nível interno é preenchido através da transição de um electrão (de um nível de energia superior), com libertação de energia. A energia dessa transição é característica dos átomos de cada elemento e pode ser libertada sob a forma de um fóton de raio X ou de um electrão Auger (Figura 3.32).

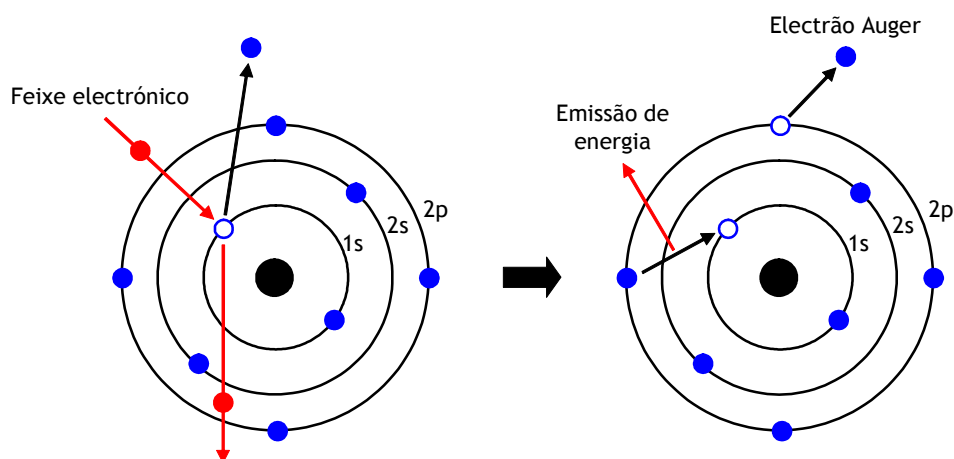


Figura 3.32 - Processo de emissão de raios X e de electrões Auger.

A emissão de raios X (com energias características dos elementos existentes no volume da amostra excitado) permite uma análise química elementar local. Os raios X emitidos podem ser usados para identificar a composição, abundância e a distribuição dos elementos na amostra (mapas de raio X).

**Electrões Auger:** são electrões emitidos durante os processos de relaxação electrónica dos átomos excitados. O feixe electrónico pode remover um electrão do cerne atómico (ficando uma orbital não preenchida). Um electrão presente numa orbital de maior energia pode transitar para essa orbital, libertando energia. Essa energia pode ser emitida sob a forma de um fóton ou pode ser transferida para outro electrão (o electrão Auger), que é ejectado do átomo. A energia dos electrões emitidos é característica do elemento emissor (o que permite identificar os elementos presentes na superfície da amostra).

**Catodoluminescência:** consiste na emissão de fótons na zona do visível quando os átomos excitados por electrões de alta energia regressam ao estado fundamental; a catodoluminescência pode ser útil para a caracterização química e estrutural dos materiais.

#### 3.6.2.4 - Instrumentação

**Sistema de vácuo:** as observações em MEV têm de ser efectuadas em alto-vácuo (pressões de cerca de  $10^{-4}$  Pa). Para tal, são normalmente utilizadas bombas rotativas (para obter um vácuo primário) e bombas difusoras ou turbomoleculares (para obter alto-vácuo).

**Feixe de electrões:** os feixes de electrões usados em MEV possuem energia controlável e pequeno diâmetro. A geração do feixe de electrões envolve três elementos: o canhão de electrões, o sistema óptico electromagnético e o sistema de deflexão electromagnético. O canhão de electrões permite gerar electrões com a energia cinética desejada (de algumas centenas de eV até algumas dezenas de KeV). O sistema óptico electromagnético é composto por lentes convergentes e diafragmas que controlam a intensidade, a geometria e o alinhamento do feixe; além disso, permitem a focagem do feixe na superfície da amostra. O sistema de deflexão electromagnético permite o deslocamento do feixe electrónico em direcções ortogonais, de modo a efectuar o varrimento da região de interesse na superfície da amostra.

**Suporte da amostra:** os suportes permitem deslocar as amostras em translação (segundo os eixos x, y e z) e em rotação; além disso, permitem inclinar as amostras.

**Sistemas de detecção e análise:** a medição da intensidade de emissão dos electrões de alta energia (electrões rectrodifundidos) e de baixa energia (electrões secundários) é efectuada em detectores especializados (colocados na vizinhança da amostra). A detecção de electrões rectrodifundidos e de electrões secundários constituem a base para a obtenção de imagens de MEV nos modos de operação mais correntes. Alguns equipamentos de MEV possuem, também, espectrómetros de raio X.

#### **3.6.2.5 - Microanálise por raio X**

Os raios X são uma forma de radiação electromagnética; possuem comprimentos de onda entre os 10 e os 0,01 nm (energias entre 120 eV a 120 KeV). Os raios X são altamente energéticos e possuem um elevado poder de penetração em materiais sólidos.

A microanálise por raio X é uma técnica de caracterização química de materiais, baseada na análise dos espectros de emissão de raios X; usa um feixe electrónico como radiação primária ionizante. A emissão de raios X provém da vizinhança (alguns  $\mu\text{m}^3$ ) da superfície da amostra excitada pelo feixe electrónico. Deste modo, permite uma análise da composição local dos materiais.

A microanálise por raio X permite a análise qualitativa das amostras: identificação dos elementos e caracterização da sua distribuição na amostra; a identificação das riscas de raio X é efectuada por comparação em bases de dados (as aplicações informáticas associadas aos espectrómetros de raio X procedem normalmente a uma identificação automática das riscas). A microanálise por raio X pode também permitir a determinação quantitativa de alguns elementos (através da análise de amostras de elementos puros ou de composição conhecida, e posterior comparação da intensidade das riscas espectrais das amostras com a intensidade das riscas espectrais dos padrões).

Os espectrómetros de raio X podem ser facilmente associados aos microscópios electrónicos; o feixe electrónico usado para a análise microscópica das amostras origina a emissão de raios X (que podem ser facilmente detectados). Assim, a associação da microscopia electrónica com a espectroscopia de raio X origina uma ferramenta muito poderosa para a caracterização de materiais.

#### **3.6.3 - Espectroscopia de infravermelho [146, 147]**

A espectroscopia de infravermelho é uma técnica analítica que utiliza a região do infravermelho do espectro electromagnético. À semelhança de outras técnicas espectroscópicas, pode ser usada para a identificação de compostos ou para a investigação da composição química de amostras.

A região infravermelha do espectro inclui radiação com comprimentos de onda entre 0,78  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$ ; esta região é normalmente dividida em três sub-regiões: o infravermelho próximo, o médio e o longínquo (Quadro 3.9). A maioria das aplicações analíticas utiliza a parte do infravermelho médio compreendida entre os 2,5 e os 25  $\mu\text{m}$  (4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ ).

Quadro 3.9 - Regiões do espectro de infravermelho.

| Região                  | Intervalo de comprimentos de onda      | Intervalos de números de onda*                 |
|-------------------------|--|--|
| Infravermelho próximo   | 0,78 $\mu\text{m}$ a 2,5 $\mu\text{m}$ | 12820 $\text{cm}^{-1}$ a 4000 $\text{cm}^{-1}$ |
| Infravermelho médio     | 2,5 $\mu\text{m}$ a 50 $\mu\text{m}$   | 4000 $\text{cm}^{-1}$ a 200 $\text{cm}^{-1}$   |
| Infravermelho longínquo | 50 $\mu\text{m}$ a 1000 $\mu\text{m}$  | 200 $\text{cm}^{-1}$ a 10 $\text{cm}^{-1}$     |

(\*o número de onda é o inverso do comprimento de onda)

As moléculas podem sofrer três tipos de transições (com uma energia exacta) quando excitadas pela radiação UV, visível ou infravermelha: transições electrónicas, transições vibracionais ou transições rotacionais. As transições electrónicas envolvem a promoção de um electrão residente numa orbital de baixa energia para uma orbital com maior energia; para ocorrer a transição, a energia fornecida pela radiação incidente deve ser igual à diferença de energia entre as duas orbitais. Ao contrário da radiação UV, a radiação infravermelha não é suficientemente energética (a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda) para causar transições electrónicas nas moléculas, mas pode promover transições vibracionais e rotacionais.

A espectroscopia de infravermelho é baseada no facto das ligações moleculares possuírem energias de vibração bem definidas. Quando a energia da radiação incidente for igual à diferença de energia entre dois níveis vibracionais, podem ocorrer transições vibracionais (para absorverem na região do infravermelho, os movimentos de vibração ou de rotação devem originar uma alteração no momento dipolar das moléculas).

As ligações moleculares podem vibrar de dois modos: tensão (*stretching*) e flexão (*bending*). As vibrações de tensão (alteração da distância interatómica) podem ser simétricas ou assimétricas. Por sua vez, as vibrações de flexão (alteração do ângulo da ligação) podem ser divididas em *rocking*, *scissoring*, *wagging* e *twisting* (Figura 3.33). Numa molécula com mais de dois átomos podem ocorrer todos os tipos de vibrações de tensão e de flexão atrás referidos. Além disso, podem ocorrer acoplamentos de vibrações quando estas forem em torno do mesmo átomo central (os acoplamentos provocam alterações nas características das vibrações).

A espectroscopia de infravermelho envolve a irradiação das amostras com um feixe (monocromático ou não, dependendo do espectrómetro usado) de radiação infravermelha; uma parte dessa radiação é absorvida (provocando transições vibracionais e/ou rotacionais), a outra parte é transmitida. Um espectro de infravermelho é uma representação da % de absorvância (ou da % de transmitância) em função do número de onda (normalmente entre os 400 e os 4000  $\text{cm}^{-1}$ ); consiste tipicamente numa série de bandas vibracionais.

As diferentes vibrações das ligações moleculares (com energia vibracional bem definida) dão origem a diferentes bandas de absorção no espectro de infravermelho. Nos casos em que existem vibrações com a mesma frequência, ocorre uma sobreposição de bandas no espectro. Na maioria dos casos, os espectros de infravermelho possuem características únicas, que permitem distinguir facilmente um composto de outros compostos.

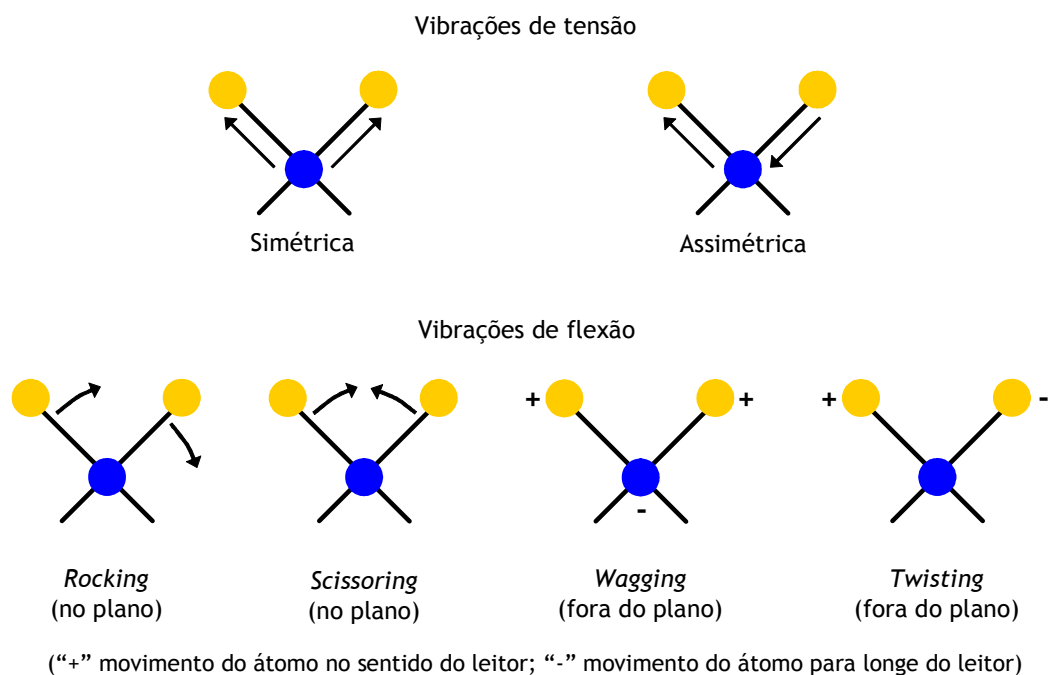


Figura 3.33 - Tipos de vibrações moleculares.

A espectroscopia de infravermelho pode ser usada para análise qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa baseia-se na identificação dos grupos funcionais presentes nas moléculas; a identificação é efectuada por comparação das posições das bandas de identidade desconhecida com as posições características de bandas conhecidas (Quadro 3.10).

Quadro 3.10 - Posições características de algumas  
bandas de absorção no infravermelho (adaptado de [9]).

| Ligação | Tipo de composto                                | Número de onda (cm <sup>-1</sup> ) |
|---------|---|------------------------------------|
| C-H     | Alcanos   | 2850-2960<br>1350-1470             |
| C-H     | Alcenos   | 3020-3080 ( <i>m</i> )<br>675-1000 |
| C-H     | Alcinos   | 3300                               |
| C-H     | Anéis aromáticos                                | 3000-3100 ( <i>m</i> )<br>675-870  |
| C=C     | Alcenos   | 1640-1680 ( <i>v</i> )             |
| C≡C     | Alcinos   | 2100-2260 ( <i>v</i> )             |
| C-O     | Álcoois, ácidos carboxílicos, éteres, ésteres   | 1080-1300                          |
| C=O     | Aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos, ésteres | 1690-1760                          |
| O-H     | Álcoois, fenóis                                 | 3610-3640 ( <i>v</i> )             |
| N-H     | Aminas  | 3300-3500 ( <i>m</i> )             |
| C-N     | Aminas  | 1180-1360                          |
| C≡N     | Nitrilos  | 2210-2260 ( <i>v</i> )             |

(bandas fortes, excepto quando marcadas com: (*m*) intensidade média; (*v*) intensidade variável)

No entanto, a identificação dos grupos funcionais de uma molécula é normalmente insuficiente para identificar inequivocamente essa molécula. Para tal, o espectro obtido (entre 400 e 4000  $\text{cm}^{-1}$ ) deve ser comparado com espectros de compostos conhecidos (existentes em bases de dados espectrais). Muitas vezes, é ainda necessário recorrer a outras técnicas (como a espectrometria de massa ou a ressonância magnética nuclear) para conseguir identificar um composto.

A análise quantitativa baseia-se no facto da intensidade de uma banda de absorção ser proporcional à concentração do componente responsável por essa banda. Deste modo, a construção de uma curva de calibração (intensidade da banda em função da concentração do composto) permite quantificar o composto existente numa amostra. A curva de calibração pode ser construída pela análise de várias amostras-padrão com diferentes concentrações (conhecidas) do composto em questão (as amostras e as amostras-padrão devem ser analisadas nas mesmas condições experimentais).

A grande selectividade das medições por infravermelho pode permitir a quantificação de compostos em algumas misturas sem a necessidade de separação prévia. O principal campo de aplicação deste tipo de análises por infravermelho está relacionado com a quantificação de diversos contaminantes atmosféricos.

Os tipos mais comuns de espectrómetros de infravermelho incluem: (1) espectrómetros dispersivos; (2) espectrómetros de infravermelho com transformada de Fourier; (3) fotómetros de filtro. Os dois primeiros são usados para obter um espectro completo para identificação qualitativa, enquanto que os fotómetros de filtro são normalmente utilizados para análise quantitativa.

Nos espectrómetros dispersivos, um raio de radiação infravermelha monocromático atinge a amostra e a quantidade de energia absorvida (ou transmitida) é medida; esta operação é repetida para todos os comprimentos de onda de interesse (normalmente, entre os 2,5 e os 25  $\mu\text{m}$ ). O modo de operação dos espectrómetros de infravermelho dispersivos é similar ao modo de operação dos espectrómetros UV de feixe duplo.

Os espectrómetros de infravermelho com transformada de Fourier não dividem a radiação nos vários comprimentos de onda. Nestes equipamentos, todos os comprimentos de onda são emitidos (passam pela amostra) e detectados em simultâneo. Para separar a informação relativa a cada comprimento de onda, o sinal é modulado na fonte e, posteriormente, é decodificado por uma transformação de Fourier. O espectro obtido é idêntico ao espectro obtido num espectrómetro dispersivo.

Os espectrómetros de infravermelho com transformada de Fourier possuem alta sensibilidade, uma boa resolução e uma elevada velocidade de aquisição de dados (um espectro inteiro pode ser obtido em menos de 1 segundo); a obtenção de um espectro nestes espectrómetros é muito mais rápida do que nos espectrómetros dispersivos.

Por fim, os fotómetros de filtro foram construídos para quantificar alguns compostos (por exemplo, poluentes atmosféricos); estes equipamentos (muitas vezes portáteis) usam filtros especificamente destinados para a determinação de certos compostos (os filtros podem ser trocados com facilidade).



### 3.6.4 - Cromatografia líquida de alta eficiência [146-149]

#### 3.6.4.1 - Considerações iniciais

A cromatografia (do grego, *chroma* - cor e *graphein* - escrita) engloba um conjunto de técnicas usadas para separar os componentes de uma mistura (amostra). Os componentes são separados com base nas suas diferentes interações entre uma fase estacionária e uma fase móvel.

As técnicas cromatográficas podem ser classificadas de diversos modos: de acordo com a natureza da fase móvel (cromatografia gasosa, líquida ou de fluido supercrítico), de acordo com as diferentes interações entre os componentes da amostra e a fase estacionária (cromatografia de adsorção, de partição, de permuta iónica, de afinidade e de exclusão molecular) e com base na forma de realizar o processo cromatográfico (cromatografia de coluna ou cromatografia plana).

A cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC - *high performance liquid chromatography*, em inglês) é, actualmente, uma das técnicas de separação mais usada; esta técnica possui um campo de aplicação muito alargado. Em seguida, procede-se a uma breve descrição da técnica de HPLC.

#### 3.6.4.2 - Componentes de um equipamento de cromatografia líquida de alta eficiência

Um equipamento de HPLC é basicamente constituído por uma bomba, um injetor, uma coluna, um detector e um registador (Figura 3.34).

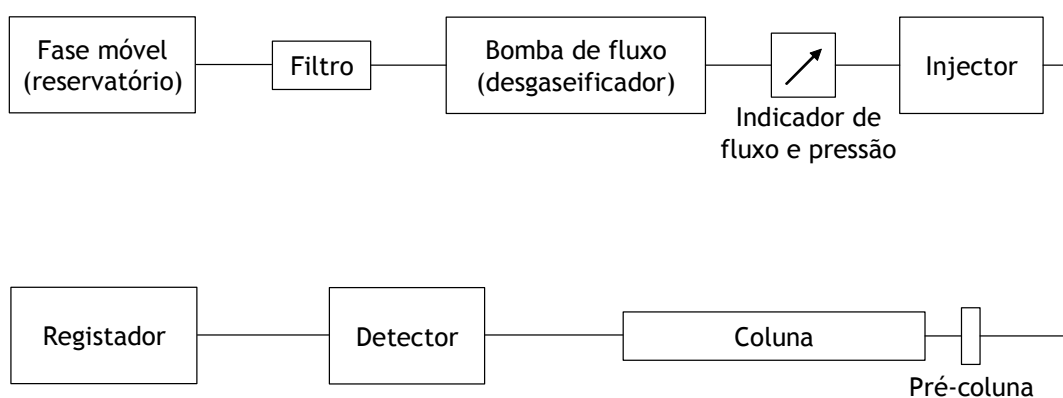


Figura 3.34 - Representação esquemática dos componentes de um sistema de cromatografia líquida de alta eficiência.

**Fase móvel:** a coluna (fase estacionária) determina as características da fase móvel a usar de modo a atingir a separação desejada. As fases normais (como o gel de sílica) requerem solventes apolares como fases móveis; se os compostos forem fortemente retidos na fase estacionária, então podem ser progressivamente misturados solventes polares na fase móvel (de modo a aumentar a extensão das interações polares e eluir os compostos mais fortemente retidos). Por sua vez, com fases reversas são usados solventes polares, como a água, o acetonitrilo ou o metanol (fases reversas é uma designação dada a fases estacionárias constituídas por hidrocarbonetos que retém solutos apolares).

A fase móvel deve ser desgaseificada antes da utilização para evitar a formação de bolhas de ar na coluna ou no detector. A fase móvel é normalmente desgaseificada por aquecimento, pela aplicação de vácuo ou por ultra-sons; os cromatógrafos modernos possuem um sistema de desgaseificação “em linha”.

**Bomba:** a função da bomba é passar a fase móvel pela coluna a uma pressão elevada e com um fluxo controlado e estável.

**Injector:** permite a injeção de uma pequena quantidade de amostra (cerca de 10 a 100  $\mu\text{L}$ ) no topo da coluna cromatográfica; são normalmente sistemas de válvulas com um *loop* (reservatório para a amostra; determina o volume de amostra injectada). A reprodutibilidade da injeção é um factor muito importante para a precisão das análises cromatográficas.

**Pré-coluna:** pequena coluna (cerca de 10 mm de comprimento) colocada entre o injector e a coluna analítica. A função da pré-coluna é proteger a coluna analítica de compostos, oriundos da amostra ou da fase móvel, que possam lá ficar permanentemente retidos. As pré-colunas devem ter o mesmo tipo de empacotamento (fase estacionária) da coluna analítica.

**Coluna:** é o local onde ocorre a separação cromatográfica. As colunas normalmente usadas em HPLC têm 10, 15 ou 25 cm de comprimento e estão empacotadas com partículas de pequeno diâmetro (3, 5 ou 10  $\mu\text{m}$ ); as colunas são designadas de acordo com o tipo de fase estacionária que possuem.

A maioria das fases estacionárias usadas em HPLC é baseada no gel de sílica; o gel de sílica pode ser usado como fase estacionária ou como suporte de “fases ligadas”. As fases ligadas, em particular as fases reversas (por exemplo,  $\text{C}_4$ ,  $\text{C}_8$  ou  $\text{C}_{18}$ ), são as fases estacionárias mais usadas em cromatografia líquida.

**Detector:** a função do detector é analisar continuamente a fase móvel à saída da coluna; permite a detecção dos componentes da amostra. O detector deve ser sensível, estável e deve fornecer uma resposta rápida e reprodutível. Os detectores mais usados em cromatografia líquida são do tipo UV; como estes detectores não são destrutivos, permitem que os componentes da amostra possam ainda ser analisados por outros tipos de detectores (como por exemplo, espectrómetros de massa).

**Registador:** permite registar continuamente a resposta do detector. Os registadores são geralmente computadores que, através de aplicações informáticas, permitem a obtenção dos cromatogramas.

#### **3.6.4.3 - Processo cromatográfico**

A cromatografia líquida envolve a passagem de uma mistura (dissolvida numa fase móvel líquida) por uma fase estacionária. Na cromatografia de eluição, a amostra é normalmente introduzida no topo de uma coluna cromatográfica (que serve de suporte à fase estacionária); os componentes a separar são deslocados ao longo da fase estacionária pelo movimento da fase móvel. A separação resulta das diferentes interações entre os componentes da mistura e a fase estacionária. Quanto mais forte for a interação entre um componente e a fase estacionária, mais tempo irá demorar esse componente a percorrer a coluna cromatográfica.

Consideremos a separação de uma mistura com dois componentes (*A* e *B*), em que o componente *A* tem menor interacção com a fase estacionária que o componente *B* (o que faz com que as moléculas do componente *A* percorram a coluna com maior velocidade que as moléculas do componente *B*). O tempo necessário para um dado componente percorrer a coluna é designado por tempo de retenção ( $tr_A$  para o componente *A*,  $tr_B$  para o componente *B*); o tempo morto ( $t_M$ ) é o tempo necessário para uma substância não interactuante percorrer a coluna. O resultado de uma análise cromatográfica (o cromatograma) é uma representação da resposta do detector em função do tempo (Figura 3.35). Os sinais cromatográficos podem ser usados para a análise qualitativa e quantitativa dos componentes presentes na amostra.

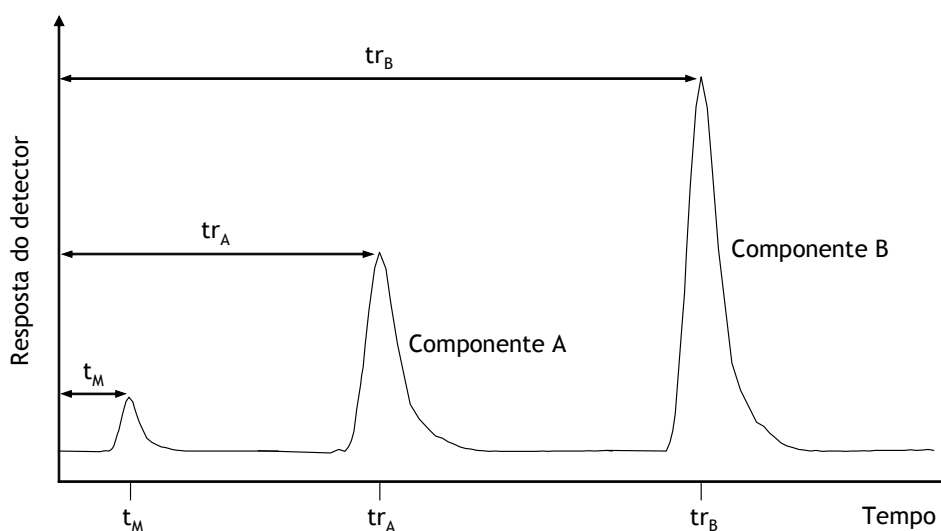


Figura 3.35 - Cromatograma ilustrativo da separação de uma mistura de dois componentes, *A* e *B*, com diferentes interações com a fase estacionária da coluna cromatográfica.

#### 3.6.4.4 - Análise qualitativa

A análise qualitativa baseia-se no tempo de retenção, que é característico de um dado componente da amostra. Assim, a análise qualitativa pode ser efectuada comparando directamente os tempos de retenção dos sinais presentes no cromatograma com os tempos de retenção obtidos para padrões, ou mesmo com tempos de retenção descritos na literatura (as condições cromatográficas têm de ser as mesmas em todas as situações).

A identidade de um composto não pode ser provada apenas por possuir um tempo de retenção igual ao tempo de retenção de um composto conhecido. A técnica normalmente utilizada de dopar a amostra com o composto conhecido puro pode dar informações importantes: no caso do sinal cromatográfico do composto a identificar aumentar, ficam reforçados os indícios de ser o composto conhecido (no entanto, e dado existirem diferentes compostos com o mesmo tempo de retenção, nunca poderá ser totalmente conclusivo); no caso do composto adicionado originar um novo sinal cromatográfico, então essa substância não existe na amostra, ou existe em quantidades inferiores ao seu limite de detecção.

### **3.6.4.5 - Análise quantitativa**

A análise quantitativa baseia-se na medição da área (ou da altura - muito dependente das condições experimentais, menor precisão) do sinal cromatográfico do composto a determinar. A quantificação é normalmente efectuada pelo método da curva de calibração, pelo método do padrão interno ou pelo método das adições de padrão.

No método da curva de calibração, a área do sinal cromatográfico do composto a quantificar (obtida na análise da amostra) é comparada com as áreas (dos sinais cromatográficos) obtidas na análise de soluções padrão (com diferentes concentrações) do mesmo composto. A partir da equação da curva obtida através da representação gráfica da área do sinal cromatográfico em função da concentração das soluções padrão, é possível calcular a concentração do composto existente na amostra.

O método do padrão interno consiste na adição à amostra de uma quantidade exacta e constante de outra espécie química (padrão interno). A análise de soluções padrão (com diversas concentrações) do composto a quantificar, às quais se adicionou a mesma quantidade do padrão interno, permite obter uma relação entre as áreas dos sinais cromatográficos (do composto a identificar e do padrão interno) e a concentração (variável) do composto de interesse. A quantidade de composto existente na amostra (dopada com a mesma quantidade de padrão interno) é encontrada usando esta relação.

O método do padrão interno é mais preciso do que o método da curva de calibração. No entanto, é necessário encontrar uma substância que funcione como padrão interno. O padrão interno não deve reagir com o composto de interesse (nem com outro componente da amostra), não deve fazer parte da composição da amostra e deve ter um tempo de retenção diferente dos tempos de retenção de todos os componentes da amostra.

O método das adições de padrão consiste na adição à amostra de quantidades exactas do composto a quantificar. A análise de amostras dopadas com diferentes quantidades do composto de interesse permite a construção de uma curva, que relaciona as áreas dos sinais cromatográficos obtidos com a quantidade de composto adicionado à amostra. A extrapolação desta curva permite determinar, no ponto de intersecção com o eixo das abcissas, a concentração de composto presente na amostra.

O método das adições de padrão permite compensar as eventuais perdas de composto que podem ocorrer durante o processo analítico. Além disso, permite ter em conta as várias interacções entre o composto de interesse e os restantes componentes da amostra (efeito de matriz).

### **3.7 - Considerações finais**

Neste capítulo, descreveram-se os principais mecanismos de degradação dos geossintéticos, foram apresentados os tipos de aditivos químicos normalmente usados para prolongar o seu tempo de vida, foram indicados os métodos existentes para avaliar a sua durabilidade e fez-se uma breve descrição das principais características dos vários estudos encontrados na literatura sobre a resistência destes materiais à degradação. Procedeu-se, também, à descrição de algumas técnicas analíticas utilizadas (na execução experimental do trabalho) para avaliar os danos sofridos pelos geossintéticos durante os vários ensaios de durabilidade.

## **PARTE II**

### **Capítulo 4**

Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis  
nos diversos ensaios de durabilidade

### **Capítulo 5**

Principais características dos geotêxteis estudados.  
Amostragem e preparação de provetes

### **Capítulo 6**

Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos

### **Capítulo 7**

Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação  
- Método do forno -

### **Capítulo 8**

Desenvolvimento de um novo equipamento e método  
para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação

### **Capítulo 9**

Determinação da resistência dos geotêxteis  
aos agentes climáticos simulados artificialmente

### **Capítulo 10**

Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais

### **Capítulo 11**

Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo



# CAPÍTULO 4

## Avaliação da degradação sofrida pelos geotêxteis nos diversos ensaios de durabilidade

### 4.1 - Introdução

Neste trabalho, os geotêxteis foram sujeitos a vários ensaios de durabilidade: imersão em líquidos (Capítulo 6), exposição à termo-oxidação (Capítulo 7 e Capítulo 8), exposição a agentes climatéricos artificiais (Capítulo 9), exposição a agentes climatéricos reais (Capítulo 10) e exposição aos agentes do solo (Capítulo 11).

A degradação sofrida pelos geotêxteis durante a exposição aos diferentes agentes de degradação foi avaliada através da monitorização de diversas características e/ou propriedades (físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas) dos materiais; os resultados obtidos para os materiais expostos foram comparados com os resultados obtidos para materiais de referência (intactos, sem qualquer tipo de degradação). As características e/ou propriedades dos geotêxteis, antes da exposição aos agentes de degradação, encontram-se detalhadamente descritas no Capítulo 5.

A degradação sofrida pelos geotêxteis durante os diferentes ensaios de durabilidade foi avaliada por uma, ou mais, das seguintes metodologias:

- (1) Inspeção sensorial dos geotêxteis - aspecto visual, libertação de odores e tacto;
- (2) Determinação de propriedades físicas - dimensões, massa por unidade de área e espessura;
- (3) Determinação de propriedades mecânicas - ensaios de tracção-extensão, de rasgamento e de punçoamento estático;
- (4) Determinação de propriedades hidráulicas - permeabilidade à água normal ao plano;
- (5) Análise dos geotêxteis por microscopia electrónica de varrimento;
- (6) Análise dos geotêxteis por microanálise por raio X;
- (7) Análise dos geotêxteis por espectroscopia de infravermelho;
- (8) Determinação do teor do aditivo Chimassorb 944 nos geotêxteis.

Neste capítulo, procede-se à descrição das metodologias utilizadas para avaliar o efeito dos diversos agentes de degradação na durabilidade dos geotêxteis. Para cada uma das metodologias indicadas, serão descritos os procedimentos de ensaio utilizados, as características dos equipamentos usados e serão apresentados os resultados de um ensaio tipo (quando aplicável); na parte final deste capítulo será descrito um método para a determinar o aditivo C944 em geotêxteis de PP por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção UV.

## 4.2 - Inspeção sensorial dos geotêxteis

A primeira avaliação dos danos sofridos pelos geotêxteis durante a exposição aos diversos agentes de degradação foi visual. A análise do aspecto global dos materiais, a olho nu, permitiu avaliar a existência de alterações de cor, bem como avaliar a existência de alguns danos (fibras degradadas, rasgos, orifícios) e outras alterações em relação às amostras de referência.

A existência de degradação nos geotêxteis foi também avaliada através da percepção de odores característicos. Por exemplo, a libertação de odores intensos a “plástico queimado” é um indicador da ocorrência de degradação nos materiais expostos à termo-oxidação pelo método do forno.

A degradação dos materiais foi também avaliada através do tacto. Assim, foi perceptível que, após os ensaios de durabilidade, alguns geotêxteis se tornaram mais duros, ásperos e rígidos, enquanto que outros se tornaram mais suaves e macios. Em algumas situações, a simples passagem das mãos pelos materiais originava a libertação de imensos pedaços de fibras degradadas, o que prontamente indicava a existência de sérios danos nos geotêxteis; alguns materiais estavam tão degradados que podiam ser transformados manualmente em pequenos pedaços ou mesmo em pó.

A avaliação dos geotêxteis através da visão, olfacto e tacto é relativamente subjectiva, pelo que deve ser sempre acompanhada pela monitorização de propriedades conhecidas (de forma a tornar a avaliação mais objectiva).

## 4.3 - Ensaio de determinação da massa por unidade de área

### 4.3.1 - Descrição do ensaio

A massa por unidade de área dos geotêxteis foi determinada segundo a norma NP EN ISO 9864:2006 (Geossintéticos. Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados). De acordo com este método de ensaio, a massa por unidade de área dos geotêxteis e dos produtos relacionados é calculada através da pesagem de provetes com dimensões conhecidas.

A norma NP EN ISO 9864 refere que devem ser cortados, pelo menos, 10 provetes (quadrados ou circulares) com uma área de 100 cm<sup>2</sup>. No entanto, podem ser utilizados provetes maiores para os materiais em que os 100 cm<sup>2</sup> não sejam representativos da sua estrutura. Os produtos relacionados que possuam uma abertura de malha relativamente larga (tais como geogrelhas ou georredes) devem ser cortados a meio de duas ligações dos seus elementos constituintes. Os provetes devem possuir, no mínimo, 5 elementos constituintes em cada uma das direcções. Neste caso, a área dos provetes cortados pode variar significativamente de material para material.

A massa por unidade de área dos geotêxteis estudados neste trabalho foi determinada através da medição e pesagem de provetes quadrados com 10 cm de lado. Os provetes foram medidos com uma craveira (precisão de 0,02 mm) e pesados numa balança analítica (marca AND, modelo HF 300G) (precisão de 0,001 g). A massa por unidade de área de cada provete,  $\mu_A$  (em g.m<sup>-2</sup>), foi calculada através da seguinte expressão:



$$\mu_A = \frac{m \times 10000}{A} \quad (4.1)$$

em que  $m$  é a massa do provete (em g) e  $A$  é a área do provete (em  $\text{cm}^2$ ).

O resultado final do ensaio é expresso através do valor médio das massas por unidade de área dos diferentes provetes (valor arredondado à unidade), acompanhado do respectivo desvio padrão e/ou coeficiente de variação. A Figura 4.1 ilustra o procedimento utilizado para a determinação da massa por unidade de área de um geotêxtil.

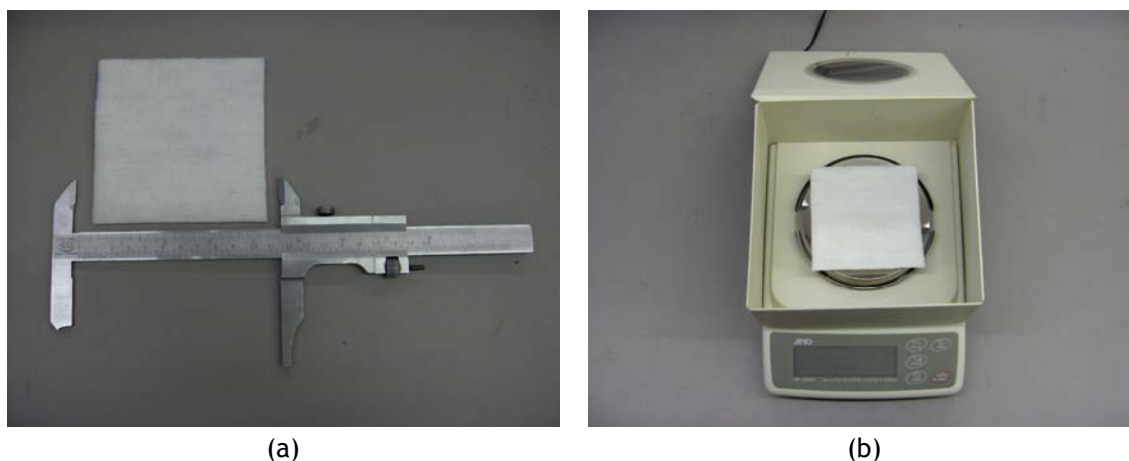


Figura 4.1 - Determinação da massa por unidade de área de um geotêxtil:  
(a) medição de um provete; (b) pesagem de um provete.

#### 4.3.2 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de determinação da massa por unidade de área de 10 provetes intactos de um geotêxtil não-tecido agulhado de PP (designado por geotêxtil B0-280) (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Resultados obtidos na determinação da massa por unidade de área de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете | Lado 1<br>(cm) | Lado 2<br>(cm) | Área<br>( $\text{cm}^2$ ) | Massa<br>(g) | $\mu_A$<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) |
|---------|----------------|----------------|---------------------------|--------------|---|
| 1       | 10,116         | 10,136         | 102,54                    | 2,577        | 251   |
| 2       | 10,066         | 10,076         | 101,42                    | 2,882        | 284   |
| 3       | 10,044         | 10,050         | 100,94                    | 3,546        | 351   |
| 4       | 10,054         | 10,258         | 103,13                    | 3,041        | 295   |
| 5       | 10,080         | 10,198         | 102,80                    | 2,512        | 244   |
| 6       | 10,184         | 10,078         | 102,63                    | 2,795        | 272   |
| 7       | 10,060         | 10,086         | 101,47                    | 2,812        | 277   |
| 8       | 10,100         | 10,060         | 101,61                    | 2,700        | 266   |
| 9       | 10,086         | 10,166         | 102,53                    | 3,237        | 316   |
| 10      | 9,974          | 10,096         | 100,70                    | 2,748        | 273   |

A informação recolhida para cada um dos provetes (dimensões e pesagem) foi tratada e procedeu-se à determinação da massa por unidade de área média, bem como dos respectivos desvio padrão e coeficiente de variação. Os resultados finais do ensaio de determinação da massa por unidade de área do geotêxtil B0-280 encontram-se resumidos no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Resultados finais do ensaio de determinação da massa por unidade de área do geotêxtil B0-280.

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| $\mu_A$ média ( $\text{g.m}^{-2}$ )  | 283 |
| Desvio padrão ( $\text{g.m}^{-2}$ )  | 32  |
| Coeficiente de variação (%)          | 11  |
| $\mu_A$ máxima ( $\text{g.m}^{-2}$ ) | 351 |
| $\mu_A$ mínima ( $\text{g.m}^{-2}$ ) | 244 |

O geotêxtil B0-280 apresenta uma massa por unidade de área de  $283 \text{ g.m}^{-2}$ , com um coeficiente de variação de 11%. O valor determinado para a massa por unidade de área do geotêxtil B0-280 é muito próximo do valor definido pelo fabricante ( $280 \text{ g.m}^{-2}$ ). Os valores individuais das massas por unidade de área dos provetes do geotêxtil B0-280 variaram entre um mínimo de  $244 \text{ g.m}^{-2}$  e um máximo de  $351 \text{ g.m}^{-2}$ .

#### 4.4 - Ensaio de determinação da espessura

##### 4.4.1 - Descrição do ensaio

A espessura dos geotêxteis foi determinada segundo a norma NP EN ISO 9863-1:2006 (Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples). Esta norma descreve um método para determinar a espessura de geossintéticos sujeitos a diferentes pressões (2 kPa, 20 kPa e 200 kPa) e define a pressão à qual a espessura nominal deve ser determinada; para a maioria dos geossintéticos (incluindo os geotêxteis), a espessura nominal é determinada quando uma pressão de  $2,00 \pm 0,01 \text{ kPa}$  é aplicada aos materiais. O método descrito na norma NP EN ISO 9863-1 é aplicável a todos os geossintéticos.

A espessura de um provete de um dado geossintético é medida como a distância entre um prato de referência (no qual é colocado o provete) e a face de contacto de um disco circular (paralelo ao prato de referência), que exerce uma determinada pressão nesse provete. A Figura 4.2 ilustra o equipamento utilizado para determinar a espessura dos geotêxteis (marca *Karl Schröder KG*). As diferentes pressões a aplicar aos geotêxteis são conseguidas através da colocação de diferentes pesos num êmbolo móvel que permite subir ou descer o disco circular (Figura 4.3).

Os provetes utilizados para a determinação da espessura (mínimo 10 provetes) devem ser cortados com dimensões mínimas superiores a 1,75 vezes o diâmetro da superfície do disco circular. Neste trabalho, foram cortados provetes quadrados com 10 cm de lado para a determinação da espessura.

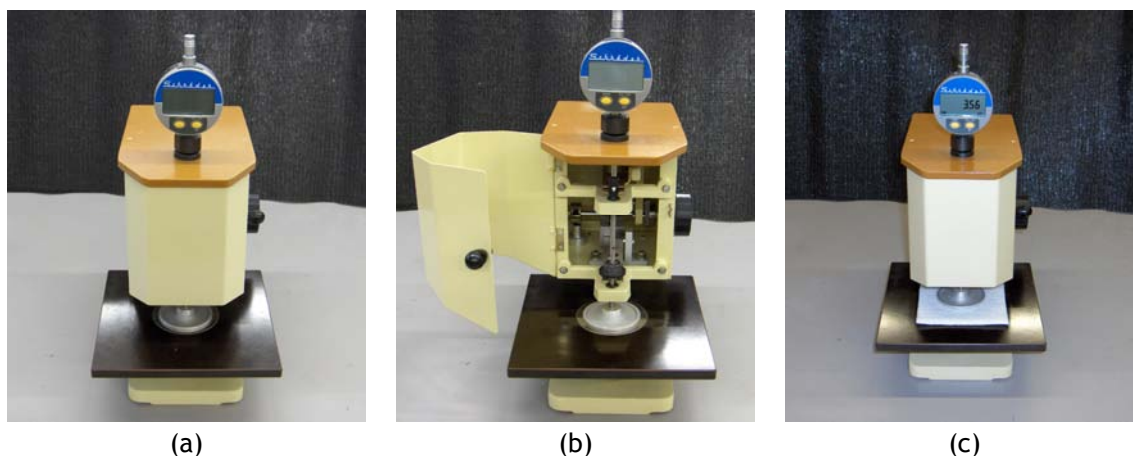


Figura 4.2 - Equipamento utilizado para a determinação da espessura dos geossintéticos:  
 (a) equipamento fechado; (b) equipamento aberto (sem nenhum peso);  
 (c) equipamento durante a determinação da espessura de um geotêxtil.



Figura 4.3 - Peso de 2 kPa usado para a determinação da espessura nominal dos geotêxteis:  
 (a) aspecto geral do peso; (b) peso instalado no medidor de espessura.

A espessura dos geossintéticos foi determinada de acordo com o seguinte procedimento: um provete foi colocado no prato de referência e o disco circular foi descido lentamente até ficar em contacto com a superfície do provete, aplicando-lhe uma pressão de  $2,00 \pm 0,01$  kPa (as superfícies do disco e do prato de referência devem estar limpas antes da colocação dos provetes). Após 30 segundos, o valor da espessura foi registado (precisão de 0,01 mm), o disco foi subido de modo a libertar a pressão exercida e o provete foi removido do prato de referência. O procedimento foi repetido até serem ensaiados, pelo menos, 10 provetes.

O procedimento anterior, caso solicitado, deve ser repetido aplicando pressões de  $20,0 \pm 0,1$  kPa e  $200 \pm 1$  kPa aos provetes. No entanto, neste trabalho apenas foi determinada a espessura nominal dos materiais (espessura à pressão de  $2,00 \pm 0,01$  kPa), isto é, a espessura exigida para os ensaios de controlo de qualidade dos materiais geossintéticos.

O resultado final do ensaio é expresso através do valor médio dos resultados individuais de cada um dos provetes (para cada uma das pressões especificadas), acompanhado do respectivo desvio padrão e/ou coeficiente de variação.

#### 4.4.2 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de determinação da espessura de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280. O Quadro 4.3 apresenta a espessura de cada um dos provetes individuais, bem com o valor médio da espessura e os correspondentes desvio padrão e coeficiente de variação.

Quadro 4.3 - Resultados obtidos na determinação da espessura de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете                     | Espessura (mm) |
|-----------------------------|----------------|
| 1                           | 3,38           |
| 2                           | 3,15           |
| 3                           | 3,15           |
| 4                           | 3,22           |
| 5                           | 3,23           |
| 6                           | 3,40           |
| 7                           | 3,31           |
| 8                           | 3,47           |
| 9                           | 3,44           |
| 10                          | 3,34           |
| Espessura média (mm)        | 3,31           |
| Desvio padrão (mm)          | 0,12           |
| Coeficiente de variação (%) | 3,6            |

O geotêxtil B0-280 apresenta uma espessura de 3,31 mm, com um coeficiente de variação de 3,6%; os valores das espessuras individuais dos provetes do geotêxtil B0-280 ensaiados variaram entre um mínimo de 3,15 mm e um máximo de 3,47 mm.

#### 4.5 - Ensaio de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319

##### 4.5.1 - Introdução

Os ensaios de tracção-extensão foram realizados de acordo com a norma NP EN ISO 10319:2005 (Geotêxteis - Ensaio de tracção em tiras largas). Neste ensaio, os provetes do material a ensaiar são fixados, ao longo da sua largura, numas garras instaladas num equipamento de tracção-extensão. O equipamento opera a uma velocidade constante, sendo aplicada uma força longitudinal ao provete, até que ocorra a sua rotura.

O método descrito na norma NP EN ISO 10319 apresenta uma particularidade relativamente a outros métodos existentes para a determinação do comportamento de tensão-extensão de geossintéticos: a largura dos provetes utilizados é maior que o seu comprimento (pelo que, o método é designado por “ensaio de tracção em tiras largas”). Alguns geossintéticos, em particular os geotêxteis, possuem a tendência de sofrer contracção lateral na zona central do provete, quando sujeitos à aplicação de

uma carga. A utilização de provetes mais largos reduz este efeito de contracção lateral e conduz a um comportamento dos materiais mais próximo do seu comportamento real (quando aplicados em campo).

Os ensaios de tracção-extensão permitem a determinação de vários parâmetros mecânicos dos geossintéticos, tais como: a resistência à tracção (considerada como uma das propriedades mais importantes dos geossintéticos), a extensão na força máxima, a rigidez secante ou a robustez.

#### 4.5.2 - Equipamento de ensaio utilizado nos ensaios de tracção-extensão

O equipamento de ensaio para a realização de ensaios tracção-extensão deve operar a uma razão de extensão constante (a velocidade de aumento do comprimento do provete deve ser uniforme no tempo) e deve possuir um sistema que permita registar os valores da força aplicada e da extensão correspondente. Os ensaios de tracção-extensão foram realizados num equipamento de ensaio universal (adaptado para a realização de ensaios com geossintéticos) existente no LGS da FEUP (marca *Lloyd Instruments*, modelo *LR50K*) (Figura 4.4). As principais características do equipamento utilizado encontram-se resumidas no Quadro 4.4.



Figura 4.4 - Equipamento usado nos ensaios de tracção-extensão.

O equipamento permite realizar ensaios de tracção e de compressão (até uma força máxima de 50 kN). O equipamento pode ser controlado por um computador através de uma aplicação própria (o equipamento pode também ser controlado localmente), onde é possível definir as condições do ensaio e acompanhar a evolução das curvas força-extensão dos provetes. A aplicação regista todos os pares de valores força-extensão (a partir dos quais é possível fazer a representação gráfica da curva força-extensão) e apresenta como resultado do ensaio a força máxima atingida pelo provete e a correspondente extensão na força máxima.

Quadro 4.4 - Principais características do equipamento utilizado nos ensaios de tracção-extensão.

|                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| Força máxima (tensão e compressão)   | 50 kN                          |
| Amplitude global da força            | 0,1 - 50 kN                    |
| Erro na medição da força             | Igual ou inferior a 1%         |
| Velocidade de ensaio                 | 0,01- 500 mm.min <sup>-1</sup> |
| Exactidão na aplicação da velocidade | ± 0,5% do valor definido       |
| Largura máxima de trabalho           | 400 mm                         |
| Extensão máxima de trabalho          | 1000 mm (excluindo as garras)  |

No início deste trabalho, o equipamento era controlado através de uma aplicação desenvolvida pelo fabricante (R Control V 3.41, *Lloyd Instruments*). Actualmente, o equipamento é controlado por uma aplicação (com algumas funcionalidades adicionais, tal como a medição da extensão por via óptica) desenvolvida pelo LGS com a colaboração do Departamento de Engenharia Electrónica e dos Computadores (DEEC) da FEUP.

No equipamento podem ser instalados diferentes tipos de garras, tendo em conta as características do material a ensaiar. As garras devem ser suficientemente largas para suportar toda a largura dos provetes e devem possuir meios apropriados para impedir o deslizamento dos mesmos durante o ensaio. Além disso, é igualmente importante que não provoquem danos nos provetes, de modo a não os fragilizar (e eventualmente provocar uma rotura na proximidade das garras). Para monitorizar a ocorrência de deslizamentos durante o ensaio, podem ser desenhadas duas linhas ao longo de toda a largura do provete junto às margens das garras.

A maioria dos geossintéticos pode ser ensaiado com garras compressivas. No entanto, para aqueles materiais em que a utilização destas garras provoca roturas ou deslizamentos excessivos, podem ser usadas garras cilíndricas. Os materiais ensaiados à tracção-extensão ao longo deste trabalho foram fixados com garras de compressão hidráulica. A Figura 4.5 ilustra os vários tipos de garras existentes no LGS da FEUP.

A força desenvolvida durante o ensaio de tracção-extensão é medida através de uma célula de carga que se encontra instalada no equipamento. A célula de carga a utilizar deve ser escolhida de modo que a força máxima atingida pelos provetes não ultrapasse a escala de força abrangida pela célula. A norma NP EN ISO 10319 refere que a rotura deve ocorrer entre os 30% e os 90% de toda a escala de força abrangida pela célula de carga; no LGS da FEUP estão disponíveis células de carga até uma força máxima de 5 kN, 10 kN e 50 kN (força máxima atingida pelo equipamento) (Figura 4.6).

A extensão sofrida pelos provetes durante os ensaios de tracção-extensão pode ser medida através de um extensómetro que segue o movimento de dois pontos de referência inicialmente definidos nesses provetes. Alternativamente, a extensão pode também ser medida através do deslocamento relativo das garras (no caso de não existirem diferenças significativas entre os resultados obtidos através do deslocamento das garras e a utilização de um extensómetro).



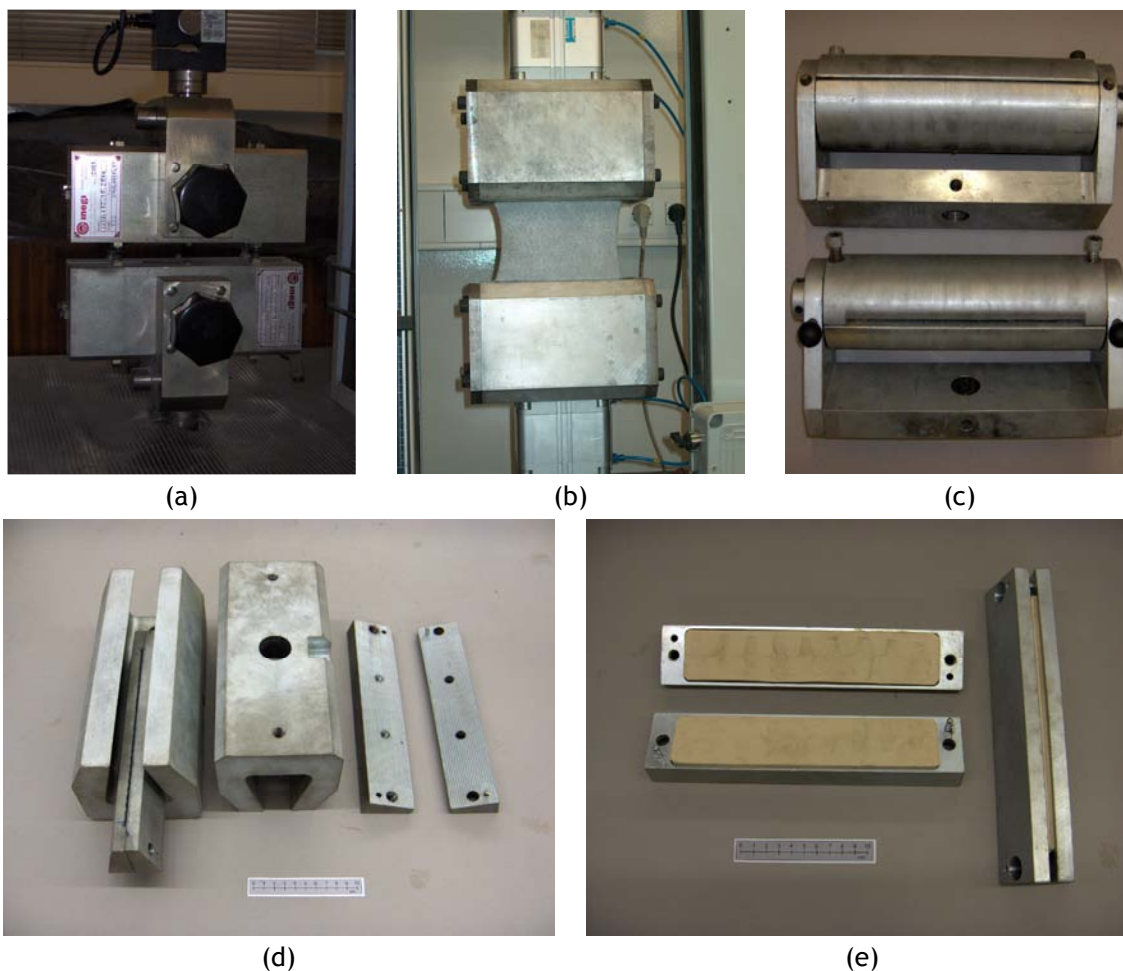


Figura 4.5 - Garras disponíveis no Laboratório de Geossintéticos da FEUP (protótipos):  
 (a) garras de compressão hidráulica; (b) garras de compressão pneumática; (c) garras cilíndricas;  
 (d) garras em cunha metálica; (e) garras em cunha metálica com face de borracha.



Figura 4.6 - Células de carga: (a) células de 5 kN e 10 kN; (b) célula instalada no equipamento.

Na fase inicial deste trabalho, o equipamento de tracção-extensão do LGS da FEUP apenas possuía a possibilidade de medir a extensão dos provetes através do deslocamento relativo das garras durante o ensaio. Actualmente, o equipamento possui um sistema de medição da extensão por via óptica (vídeo-extensómetro). A implementação de um vídeo-extensómetro implicou o desenvolvimento de uma nova aplicação para o controlo do sistema de medição (aplicação desenvolvida pelo LGS da

FEUP com a colaboração do DEEC da FEUP). Esta nova aplicação (que substituiu a aplicação original desenvolvida pelo fabricante do equipamento) controla todos os parâmetros do ensaio, bem como regista todos os resultados obtidos durante o ensaio.

A possibilidade de medição da extensão através de um vídeo-extensómetro só ficou disponível quando um número bastante elevado de ensaios de tracção-extensão já tinha sido realizado (com a extensão determinada através do deslocamento relativo das garras). Assim, e de modo a manter uma uniformidade de resultados, todos os valores de extensão apresentados ao longo deste trabalho foram determinados através do deslocamento entre as garras. Do mesmo modo, todos os parâmetros mecânicos que necessitam da extensão para a sua determinação (rigidez secante e robustez) foram calculados utilizando os valores de extensão obtidos pelo afastamento relativo das garras.

#### 4.5.3 - Procedimento de ensaio

A norma NP EN ISO 10319 estabelece que devem ser ensaiados, pelo menos, 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico; os provetes devem ser cortados com uma largura de 200 mm e devem possuir comprimento suficiente para a distância entre as garras ser de 100 mm. A Figura 4.7 ilustra o aspecto dos provetes para o ensaio de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319.

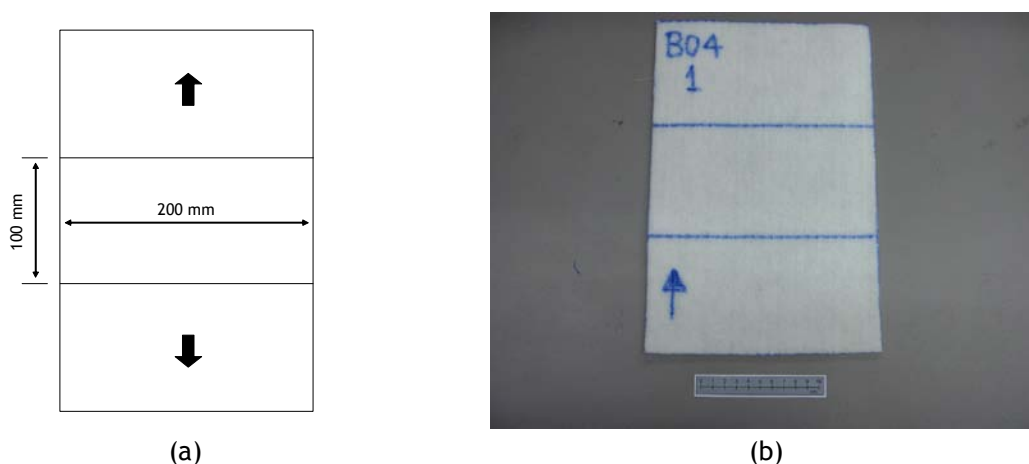


Figura 4.7 - Aspecto de um provete para o ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319: (a) esquema do provete; (b) provete de um geotêxtil (com identificação do material e indicação da direcção de fabrico).

A posição da garra superior deve ser ajustada de modo a que no início do ensaio esteja a uma distância de  $100 \pm 3$  mm da garra inferior (a distância entre garras determina o comprimento do provete a ensaiar). Os provetes devem ser colocados centrados nas garras e o alinhamento ao longo do seu comprimento deve ser paralelo à direcção de aplicação da força.

No caso da medição da extensão ser efectuada através do vídeo-extensómetro, devem ser fixados pontos de referência nos provetes, afastados 60 mm entre si (30 mm acima e abaixo do centro de simetria do provete) (Figura 4.8). A extensão do provete é definida através da medição, durante o ensaio, da distância entre os centros dos dois pontos de referência. Antes do ensaio, é necessário efectuar a calibração do vídeo-extensómetro. Para tal, é utilizada uma régua de calibração com



vários pontos de referência, cujos centros se encontram a uma distância de 60 mm entre si. Durante o ensaio é importante assegurar a inexistência de deslizamento dos pontos de referência, o que iria conduzir a valores inexactos da extensão medida.

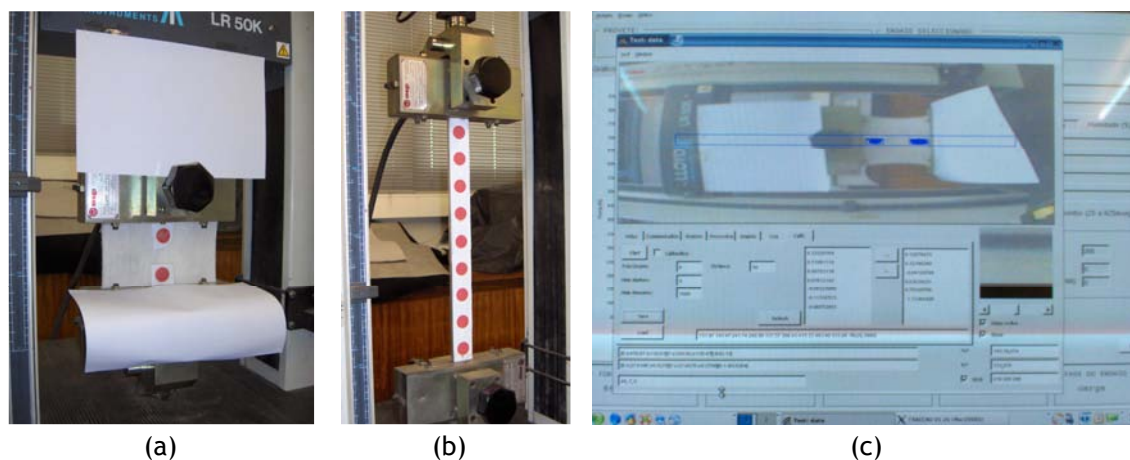


Figura 4.8 - Sistema de medição da extensão por via óptica: (a) provete com os pontos de referência; (b) régua de calibração; (c) aplicação de controlo do vídeo-extensómetro.

A razão de extensão aplicada ao provete durante o ensaio deve ser  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . A distância entre as garras vai aumentando com o tempo e o ensaio termina quando ocorrer a rotura do provete. Após o fim do ensaio, as garras regressam à sua posição original (a distância de 100 mm entre as garras deve ser sempre confirmada) e o equipamento está preparado para ensaiar o provete seguinte. A Figura 4.9 ilustra as diversas etapas de um ensaio de tracção-extensão.

Após a rotura do provete, é necessário decidir se o ensaio é válido ou se existem motivos para a sua rejeição. A decisão de rejeição é tomada com base na observação do comportamento do provete ao longo do ensaio e na verificação da existência de irregularidades. A existência de escorregamento dos provetes nas garras, a existência de roturas provocadas por danos induzidos pelas garras ou a existência de deslizamento dos pontos de referência quando se utiliza o vídeo-extensómetro são motivos para a rejeição dos ensaios.

A experiência mostra que muitos provetes sofrem rotura nas proximidades das garras. Assim, se esta rotura for provocada pelas próprias garras, então os resultados devem ser rejeitados. No entanto, se a rotura ocorrer nas proximidades das garras apenas devido à distribuição aleatória de zonas menos resistentes no provete, então esse é um resultado válido e deve ser considerado. Em alguns casos, uma rotura nas proximidades das garras pode também ser causada por uma concentração de tensão na área adjacente às garras, pois elas impedem que os provetes diminuam de largura nesta zona durante a aplicação da carga. Nestes casos, a existência de uma rotura perto da extremidade das garras é inevitável e deve ser aceite como uma característica específica do método de ensaio.

Assim, e na ausência de qualquer outro motivo para rejeitar os resultados de um provete que possua uma rotura na proximidade das garras, a norma NP EN ISO 10319 estabelece um critério em que os resultados de um provete em que a rotura ocorra até 5 mm das garras e resulte num valor abaixo de 50% dos valores médios das roturas dos restantes provetes devem ser rejeitados.

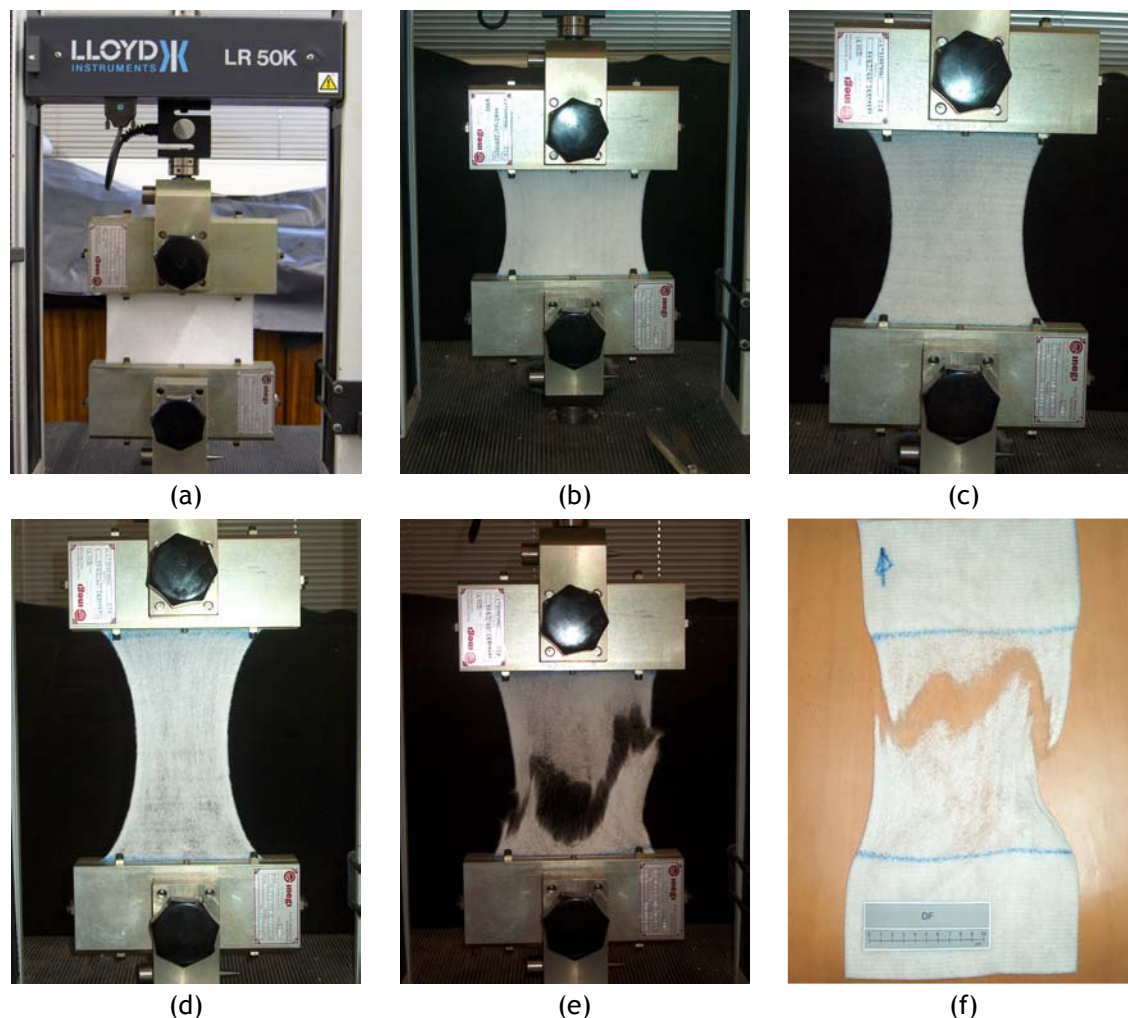


Figura 4.9 - Ensaio de tracção-extensão de um geotêxtil segundo a norma NP EN ISO 10319: (a) início do ensaio; (b), (c) e (d) durante o ensaio; (e) final do ensaio; (f) aspecto do provete após o ensaio.

#### 4.5.4 - Resultados obtidos a partir de um ensaio de tracção-extensão

##### 4.5.4.1 - Considerações iniciais

Os resultados obtidos a partir de um ensaio de tracção-extensão incluem normalmente os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima do conjunto de provetes ensaiados (no mínimo 5 provetes), bem como os respectivos desvio padrão e/ou coeficiente de variação. Além destes resultados, podem também ser incluídos os valores da rigidez secante média (determinados para diferentes extensões) e os valores da robustez média.

Actualmente, os equipamentos de tracção-extensão são normalmente controlados por aplicações que, no final do ensaio, são capazes de fornecer imediatamente os valores da resistência à tracção do provete e da correspondente extensão na força máxima, bem como os dados necessários para a representação gráfica da força em função da extensão (curva força-extensão) do provete ensaiado; o tratamento destas curvas permite calcular todos os parâmetros que são geralmente apresentados como resultados finais dos ensaios de tracção-extensão.

De seguida, procede-se à descrição do modo de determinação dos principais parâmetros mecânicos vulgarmente apresentados como resultados dos ensaios de tracção-extensão. Primeiro, os diferentes parâmetros são determinados individualmente para cada provete e, em seguida, são calculados os valores médios obtidos para o conjunto de provetes ensaiados, bem como os valores dos respectivos desvios padrão e/ou coeficientes de variação.

#### 4.5.4.2 - Resistência à tracção

A resistência à tracção,  $T$ , de um geossintético (em  $\text{kN.m}^{-1}$ ) pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$T = F_{\max} \times C \quad (4.2)$$

em que  $F_{\max}$  é a força máxima (em kN) registada durante o ensaio de tracção-extensão e  $C$  é um parâmetro obtido a partir das Expressões 4.3 ou 4.4, conforme o caso.

Para geotêxteis não-tecidos, tecidos de malha apertada ou materiais similares com uma largura nominal de provete  $B$  (em metros):

$$C = \frac{1}{B} \quad (4.3)$$

Para geotêxteis tecidos de malha larga, georredes, geogrelhas ou materiais semelhantes com uma estrutura aberta:

$$C = \frac{N_M}{N_S} \quad (4.4)$$

em que  $N_M$  é o número mínimo de elementos (barras, filamentos ou fitas) existentes em 1 metro de largura do material e  $N_S$  é o número de elementos existentes no provete sujeito ao ensaio de tracção-extensão.

A resistência à tracção dos geossintéticos após a exposição aos diversos agentes de degradação pode ser expressa em termos de resistência residual ( $R_{\text{RES}}$ ). A resistência residual (em %) pode ser obtida dividindo a resistência à tracção dos provetes expostos ( $T_{\text{EXP}}$ ) pela resistência à tracção dos provetes de referência ( $T_{\text{REF}}$ ):

$$R_{\text{RES}} = \frac{T_{\text{EXP}}}{T_{\text{REF}}} \times 100 \quad (4.5)$$

#### 4.5.4.3 - Extensão na força máxima

A extensão,  $E$ , de um provete (em %) em qualquer momento do ensaio de tracção-extensão pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$E = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4.6)$$

em que  $L$  é a distância entre os dois pontos de referência (distância entre garras na ausência de um extensômetro) no momento escolhido do ensaio e  $L_0$  é a distância inicial de referência.

A extensão na força máxima,  $E_{Fmax}$  (em %), é a extensão apresentada pelo geossintético no momento em que a força atinge o seu valor máximo. A  $E_{Fmax}$  pode ser calculada através da Expressão 4.6, substituindo o parâmetro  $L$  pelo parâmetro  $L_{Fmax}$  (distância entre os dois pontos de referência no momento em que foi atingida a força máxima).

#### 4.5.4.4 - Rigidez secante

A rigidez secante,  $J_{SEC}$  (em  $\text{kN.m}^{-1}$ ) (Figura 4.10), pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$J_{SEC} = \frac{F_E \times C}{E} \times 100 \quad (4.7)$$

em que  $F_E$  é a força (em kN) determinada para uma extensão especificada  $E$  (em %) e  $C$  é determinado a partir das Expressões 4.3 ou 4.4, conforme o caso.

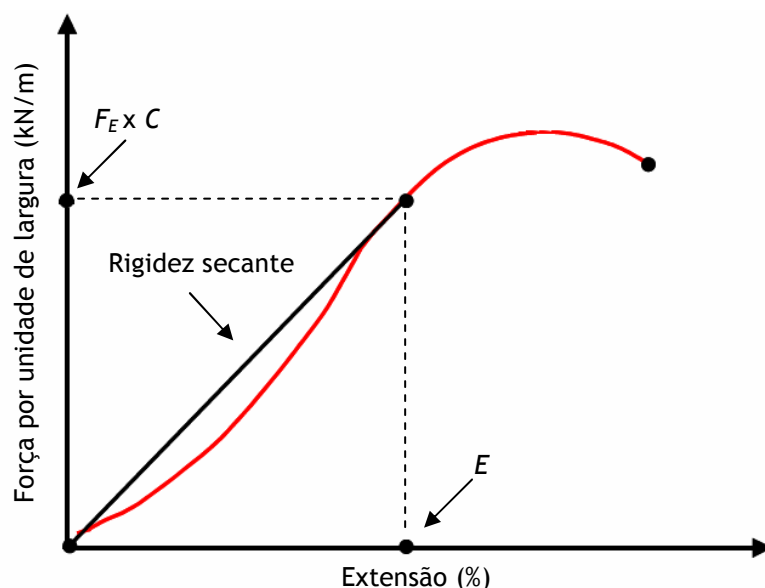


Figura 4.10 - Curva típica força-extensão com indicação da rigidez secante.  
(adaptado da norma NP EN ISO 10319)

#### 4.5.4.5 - Robustez

A robustez,  $W$ , (em inglês, *toughness*) é a energia máxima que um material pode absorver antes de ocorrer a sua rotura (este parâmetro é também vulgarmente designado como potencial de absorção de energia). A robustez de um geossintético, em  $\text{kN.m}^{-1}$  (ou  $\text{KJ.m}^{-2}$ ), pode ser determinada através do cálculo da área abaixo da curva força-extensão do material (Figura 4.11).

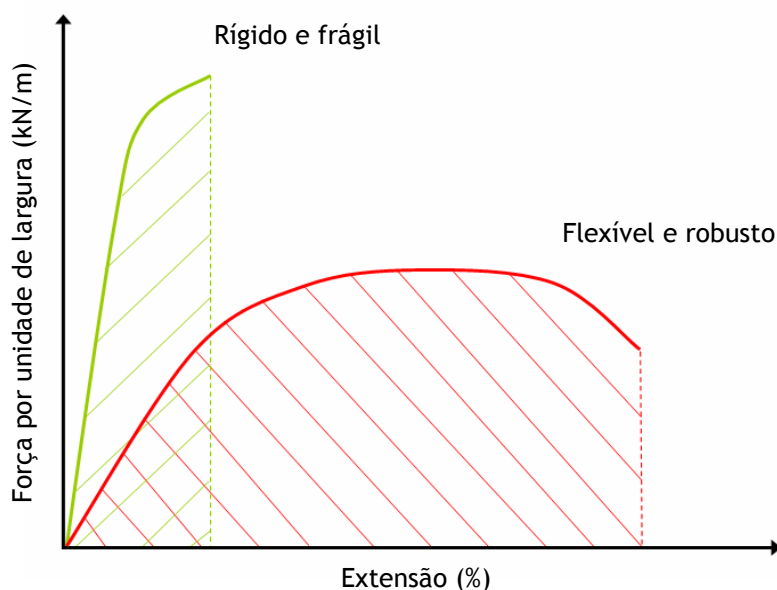


Figura 4.11 - Curvas típicas força-extensão com indicação da robustez.

A robustez dos geossintéticos após exposição aos diversos agentes de degradação pode ser expressa em termos de robustez residual ( $W_{RES}$ ). A  $W_{RES}$  (em %) pode ser determinada dividindo a robustez dos provetes expostos ( $W_{EXP}$ ) pela robustez dos provetes de referência ( $W_{REF}$ ):

$$W_{RES} = \frac{W_{EXP}}{W_{REF}} \times 100 \quad (4.8)$$

#### 4.5.4.6 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de tracção-extensão de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280 (provetes ensaiados na direcção de fabrico). O Quadro 4.5 apresenta os valores da força máxima, da resistência à tracção e da extensão na força máxima de cada um dos provetes ensaiados. A partir dos resultados dos provetes individuais, foram calculados os valores médios correspondentes, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 4.5 - Resultados obtidos para a força máxima, resistência à tracção e extensão na força máxima no ensaio de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете                     | $F_{max}$<br>(kN) | $T$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $E_{Fmax}$<br>(%) |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| 1                           | 2,74              | 13,7                         | 114               |
| 2                           | 2,52              | 12,6                         | 122               |
| 3                           | 2,56              | 12,8                         | 107               |
| 4                           | 2,87              | 14,3                         | 126               |
| 5                           | 2,71              | 13,6                         | 110               |
| Valor médio                 | 2,68              | 13,4                         | 116               |
| Desvio padrão               | 0,14              | 0,7                          | 8                 |
| Coeficiente de variação (%) | 5,2               | 5,2                          | 6,9               |

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 apresenta um valor médio de  $13,4 \text{ kN.m}^{-1}$  (coeficiente de variação de 5,2%), enquanto que a correspondente extensão na força máxima apresenta um valor médio de 116 % (coeficiente de variação de 6,9%). As curvas força-extensão individuais, bem como a curva força-extensão média dos 5 provetes ensaiados encontram-se representadas na Figura 4.12.

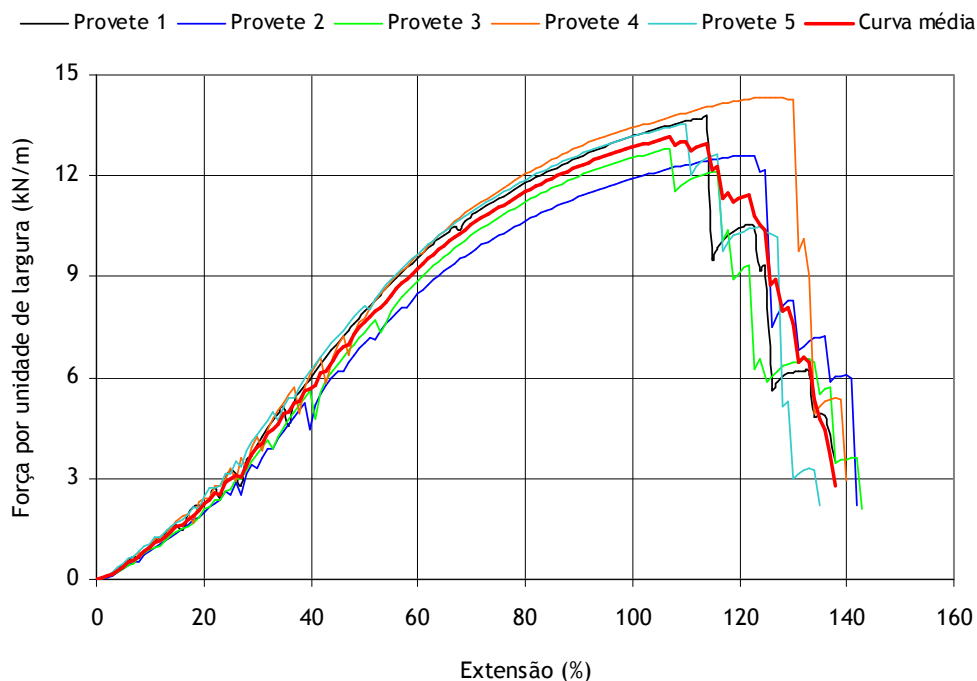


Figura 4.12 - Curvas força-extensão individuais e curva força-extensão média dos 5 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.

As curvas força-extensão permitem determinar a robustez (através da integração da área abaixo da curva) e a rigidez secante dos materiais a diferentes valores de extensão (através da interpolação de  $(F_E \times C)$  na curva para a extensão especificada,  $E$ , e posterior aplicação da Expressão 4.7).

A norma NP EN ISO 10319 refere que a rigidez secante deve ser determinada, pelo menos, para as extensões de 2%, 5% e 10%. A determinação da rigidez secante para extensões superiores a 10% não é muito comum porque, em situações reais, a extensão dos geossintéticos muito dificilmente poderá atingir valores tão altos sem por em causa a estabilidade global da estrutura onde estão inseridos. No entanto, e para uma melhor caracterização do comportamento dos materiais, a rigidez secante foi também determinada para a extensão de 20%.

O Quadro 4.6 resume os valores da rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e da robustez de cada um dos provetes ensaiados do geotêxtil B0-280. A partir dos valores individuais de cada provete, foram calculados os correspondentes valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação.

Os valores da resistência à tracção, da extensão na força máxima, da rigidez secante e da robustez também podem ser determinados graficamente a partir da curva média força-extensão. No entanto, os valores obtidos a partir da curva média força-extensão nem sempre coincidem exactamente com os valores determinados a partir da média dos resultados individuais de cada provete. O Quadro 4.7 compara os valores obtidos a partir da curva média força-extensão ( $V_{CM}$ ) com os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes ( $V_M$ ).

Quadro 4.6 - Resultados obtidos para a rigidez secante e para a robustez no ensaio de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете                     | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 20\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | W<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|--|--|---|---|----------------------------|
| 1                           | 5,0                                    | 8,0                                    | 10,1                                    | 11,1                                    | 1098                       |
| 2                           | 3,7                                    | 6,3                                    | 8,4                                     | 9,9                                     | 1073                       |
| 3                           | 4,0                                    | 6,5                                    | 8,7                                     | 10,4                                    | 1047                       |
| 4                           | 4,7                                    | 8,3                                    | 10,1                                    | 12,0                                    | 1223                       |
| 5                           | 6,3                                    | 9,6                                    | 10,7                                    | 12,5                                    | 1091                       |
| Valor médio                 | 4,7                                    | 7,7                                    | 9,6                                     | 11,2                                    | 1106                       |
| Desvio padrão               | 1,0                                    | 1,4                                    | 1,0                                     | 1,1                                     | 68                         |
| Coeficiente de variação (%) | 21                                     | 18                                     | 10                                      | 9,8                                     | 6,2                        |

Quadro 4.7 - Resultados obtidos no ensaio de tracção-extensão de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valores médios *versus* valores calculados a partir da curva média.

| Geotêxtil B0-280                    | T<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $E_{Fmax}$<br>(%) | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 20\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | W<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------------|--|--|---|---|----------------------------|
| $V_M$                               | 13,4                       | 116               | 4,7                                    | 7,7                                    | 9,6                                     | 11,2                                    | 1106                       |
| $V_{CM}$                            | 13,2                       | 107               | 4,7                                    | 7,7                                    | 9,6                                     | 11,2                                    | 1095                       |
| $\Delta = (V_M - V_{CM}) / V_M$ (%) | 1,5                        | 7,8               | 0                                      | 0                                      | 0                                       | 0                                       | 1,0                        |

( $V_M$  - valor médio;  $V_{CM}$  - valor da curva média)

Os  $V_M$  e  $V_{CM}$  da resistência à tracção e da robustez são muito semelhantes (desvio de 1,5% para a resistência à tracção e de 1,0% para a robustez). A extensão na força máxima apresentou o maior desvio entre o  $V_M$  e o  $V_{CM}$  (desvio de 7,8%). A rigidez secante (às diferentes extensões determinadas) não apresentou qualquer desvio entre o  $V_M$  e o  $V_{CM}$ .

Os valores da resistência à tracção e da extensão na força máxima apresentados ao longo deste trabalho serão sempre os valores obtidos directamente a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes ensaiados. Os resultados da rigidez secante e de robustez serão os valores calculados a partir da curva média força-extensão de todos os provetes ensaiados. Dado o número muito elevado de provetes ensaiados à tracção-extensão, a apresentação dos resultados da rigidez secante e da robustez em termos de  $V_{CM}$  (em detrimento dos  $V_M$ ) resultou numa economia de tempo considerável, em termos de tratamento de resultados; além disso, não foram encontradas grandes diferenças entre os  $V_{CM}$  e os  $V_M$  destes parâmetros. As curvas médias força-extensão serão exibidas para comparar o comportamento dos geotêxteis antes e após a exposição aos diversos agentes de degradação.

O ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319 foi utilizado para avaliar a degradação sofrida pelos geotêxteis após os seguintes ensaios de durabilidade: exposição à oxidação induzida pela temperatura (Capítulo 7), exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10) e exposição aos agentes do solo (Capítulo 11).

## **4.6 - Ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3**

### **4.6.1 - Introdução**

Ao longo deste trabalho, foram também realizados ensaios de tracção-extensão de acordo com os procedimentos descritos na norma NP EN 29073-3:1993 (Têxteis - Métodos de ensaio para tecidos não-tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento).

A norma NP EN 29073-3 descreve uma metodologia para determinar a relação de tracção-extensão de materiais não-tecidos através do método da tira. Os ensaios de tracção-extensão realizados segundo esta norma são muito semelhantes aos ensaios realizados de acordo com a norma NP EN ISO 10319, diferindo essencialmente nas dimensões dos provetes a ensaiar (provetes com menor largura e com maior comprimento) e na velocidade do ensaio.

As normas que descrevem os ensaios de determinação da resistência a ácidos e a bases (EN 14030), de determinação da resistência à hidrólise (EN 12447), de determinação da resistência à oxidação (NP EN ISO 13438) e de determinação da resistência ao envelhecimento climatérico (NP EN 12224) referem que os provetes dos geossintéticos a ensaiar devem ser preparados de acordo com a norma NP EN 12226:2005 (Geotêxteis e produtos relacionados - Ensaios gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade). A norma NP EN 12226 refere que os ensaios de tracção-extensão para os geotêxteis não-tecidos devem ser efectuados de acordo com a norma NP EN 29073-3.

A norma NP EN 29073-3 foi usada para determinar as propriedades mecânicas (associadas à relação tracção-extensão) dos geotêxteis após a exposição aos seguintes ensaios de durabilidade: imersão em líquidos (Capítulo 6), termo-oxidação com alta pressão de O<sub>2</sub> (Capítulo 8) e exposição a agentes climatéricos artificiais (Capítulo 9).

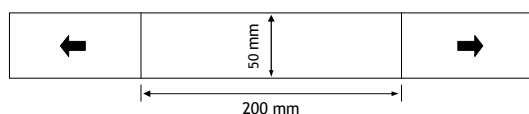
### **4.6.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos**

Os equipamentos utilizados nos ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3 são os mesmos anteriormente descritos no ponto 4.5.2 para os ensaios de tracção-extensão segundo a NP EN ISO 10319. Os geotêxteis ensaiados de acordo com a norma NP EN 29073-3 foram também fixados através das garras de compressão hidráulica (alternativamente, também poderiam ter sido utilizadas as garras pneumáticas ou as garras em cunha metálica).

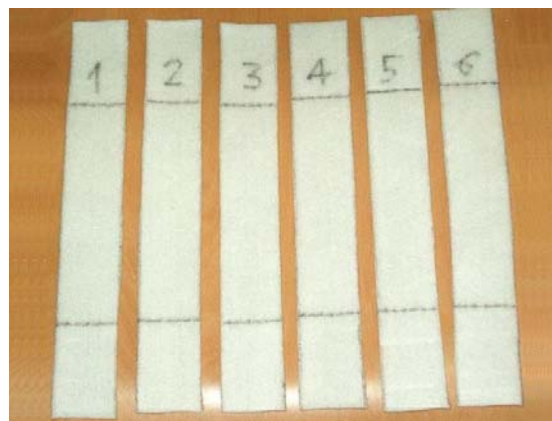
De acordo com a norma NP EN 29073-3, os provetes para o ensaio de tracção-extensão devem ser cortados com  $50,0 \pm 0,5$  mm de largura e com comprimento suficiente para que a distância entre as garras seja de 200 mm. A Figura 4.13 ilustra o aspecto dos provetes de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3.

No início do ensaio, as garras do equipamento de tracção-extensão devem ser posicionadas com um afastamento entre si de  $200 \pm 1$  mm e o provete é colocado no centro das garras (o alinhamento ao longo do comprimento do provete deve ser paralelo à direcção de aplicação da força); a velocidade de ensaio é de  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Com a excepção das diferenças já apresentadas, o procedimento do ensaio de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3 é semelhante ao procedimento descrito para o ensaio de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (ponto 4.5.3).





(a)



(b)

Figura 4.13 - Aspecto de um provete para o ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3: (a) esquema do provete; (b) provetes de um geotêxtil.

A Figura 4.14 ilustra as várias etapas de um ensaio de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.14 - Ensaio de tracção-extensão de um geotêxtil segundo a norma NP EN 29073-3: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) final do ensaio.

Os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3 permitem determinar os mesmos parâmetros mecânicos que os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (ponto 4.5.4). No entanto, a norma NP EN 29073-3 apenas refere como resultados do ensaio o valor médio da força máxima (em N) e o valor médio da extensão na força máxima (em %) (calculado com base no deslocamento relativo das garras). Apesar disso, para os ensaios realizados de acordo com a norma NP EN 29073-3 serão determinados os mesmos parâmetros mecânicos que os determinados nos ensaios realizados segundo a norma NP EN ISO 10319.

O tratamento dos dados obtidos nos ensaios de tracção-extensão segundo a NP EN 29073-3 é igual ao tratamento anteriormente descrito para os ensaios de acordo com NP EN ISO 10319. Neste trabalho, os resultados finais dos ensaios de tracção-extensão segundo a NP EN 29073-3 incluem os valores da resistência à tracção, da extensão na força máxima, da rigidez secante (determinada às extensões de 2%, 5%, 10% e 20%) e da robustez.

## 4.7 - Ensaios de rasgamento

### 4.7.1 - Introdução

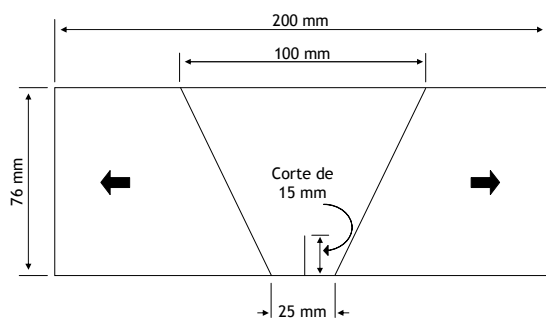
A determinação da resistência ao rasgamento dos geotêxteis foi efectuada de acordo com a norma ASTM D4533-04(2009) (*Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles*). Neste método de ensaio, é determinada a força necessária para a propagação de um rasgo (previamente efectuado no provete) num geotêxtil tecido ou não-tecido.

A norma ASTM D4533 foi usada para determinar a resistência ao rasgamento dos geotêxteis após a exposição aos seguintes ensaios de durabilidade: exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10) e exposição aos agentes do solo (Capítulo 11).

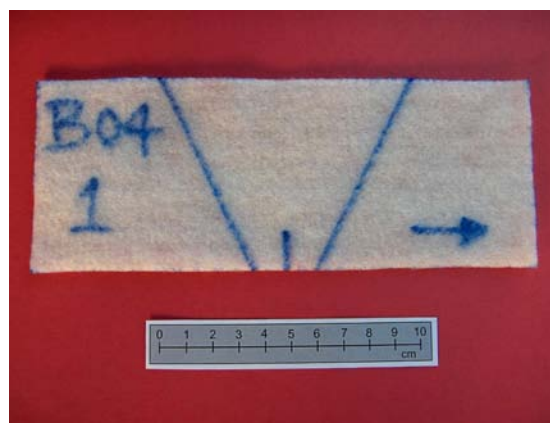
### 4.7.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos

O equipamento utilizado nos ensaios de rasgamento foi o mesmo que foi usado para a realização dos ensaios de tracção-extensão. Os provetes foram fixados com garras de compressão hidráulica, mas também poderiam ter sido usadas as garras pneumáticas ou as garras em cunha metálica; as garras devem impedir o deslizamento dos provetes durante o ensaio, sem os danificar.

Os provetes utilizados no ensaio de rasgamento têm uma forma rectangular, possuindo um trapézio desenhado no seu centro. A meio do lado menor do trapézio é efectuado um corte de 1,5 cm (corte paralelo ao lado menor do provete). A Figura 4.15 ilustra o aspecto dos provetes usados nos ensaios de rasgamento.



(a)



(b)

Figura 4.15 - Aspecto de um provete para o ensaio de rasgamento de acordo com a norma ASTM D4533: (a) esquema do provete; (b) provete de um geotêxtil (com identificação do material e indicação da direcção de fabrico).

Os dois lados não paralelos do trapézio desenhado no provete são presos nas garras do equipamento de tracção (garras à distância inicial de  $25 \pm 1$  mm). A separação das garras aumenta gradualmente a uma velocidade constante de  $300 \pm 10$  mm.min<sup>-1</sup>, o que provoca a propagação do rasgo ao longo da largura do provete. A força desenvolvida durante o ensaio é registada, bem como a respectiva extensão. A Figura 4.16 ilustra as etapas de um ensaio de rasgamento segundo a norma ASTM D4533.

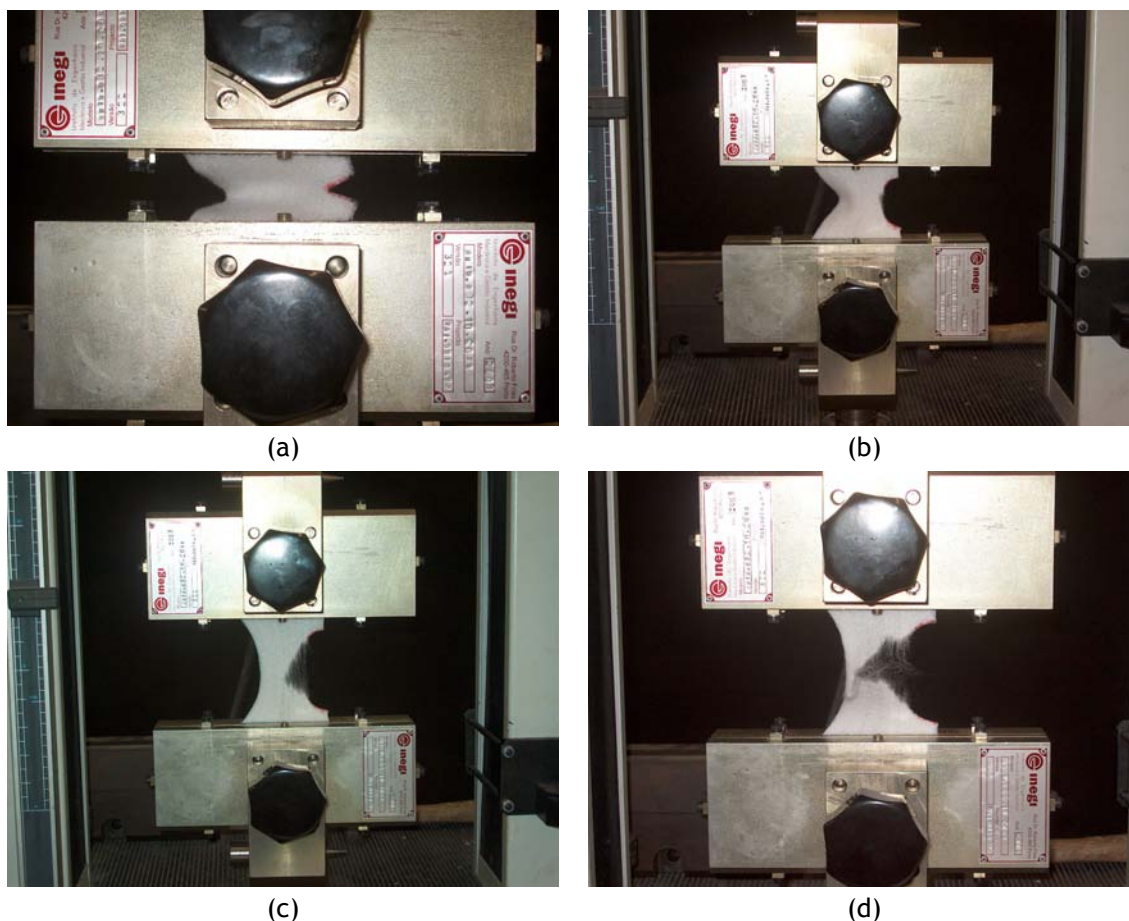


Figura 4.16 - Ensaio de rasgamento de um geotêxtil segundo a norma ASTM D4533:  
(a) início do ensaio; (b) e (c) durante o ensaio; (d) final do ensaio.

Após o fim do ensaio, é necessário decidir se o resultado obtido é válido ou se existem motivos para rejeitá-lo. A norma ASTM D4533 define que devem ser rejeitados os resultados de todos os provetes que sofram escorregamento nas garras durante o ensaio, bem como todos os resultados individuais que se desviem em 25% ou mais do valor médio do conjunto de provetes ensaiados (em substituição dos provetes rejeitados devem ser ensaiados provetes adicionais).

A resistência ao rasgamento é definida como o valor máximo da força (em N) registrada durante o ensaio. O resultado final de um ensaio de rasgamento é expresso pelo valor médio da resistência ao rasgamento de todos os provetes ensaiados (no mínimo 10 provetes), acompanhado dos respectivos desvio padrão e/ou coeficiente de variação. A resistência ao rasgamento dos geossintéticos após a exposição aos diversos agentes de degradação pode ser expressa em termos de resistência residual (em %), obtida dividindo a resistência ao rasgamento dos provetes expostos pela resistência ao rasgamento dos provetes de referência.

### 4.7.3 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de rasgamento de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280 (provetes ensaiados na direcção de fabrico). O Quadro 4.8 apresenta os valores das resistências ao rasgamento de todos os provetes ensaiados. A partir dos resultados dos provetes individuais, foram calculados os valores médios correspondentes, assim como os respectivos desvio padrão e coeficiente de variação. São também apresentados os desvios de cada valor individual em relação ao valor médio da resistência ao rasgamento.

Quadro 4.8 - Resultados obtidos no ensaio de rasgamento de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете                     | Resistência ao rasgamento (N) | Desvio ao valor médio (%) |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1                           | 458                           | + 19,0                    |
| 2                           | 371                           | - 3,6                     |
| 3                           | 395                           | + 2,6                     |
| 4                           | 336                           | - 12,7                    |
| 5                           | 347                           | - 9,9                     |
| 6                           | 354                           | - 8,1                     |
| 7                           | 358                           | - 7,0                     |
| 8                           | 356                           | - 7,5                     |
| 9                           | 428                           | + 11,2                    |
| 10                          | 450                           | + 16,9                    |
| Valor médio                 | 385                           | ---                       |
| Desvio padrão               | 45                            | ---                       |
| Coeficiente de variação (%) | 12                            | ---                       |

A resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280 apresenta um valor médio de 385 N (coeficiente de variação de 12%). As curvas de rasgamento individuais, bem como a curva de rasgamento média dos 10 provetes ensaiados encontram-se representadas na Figura 4.17.

As curvas de rasgamento dos provetes individuais do geotêxtil B0-280 possuem vários máximos e mínimos, a diferentes extensões de provete para provete (para uma mesma extensão, um provete pode possuir um máximo, enquanto que outro pode possuir um mínimo). Na curva de rasgamento média, os máximos e os mínimos têm tendência a anularem-se entre si, suavizando a forma da curva comparativamente à forma da curva de rasgamento de um provete individual. Assim, a forma da curva de rasgamento média não representa rigorosamente o comportamento dos provetes durante o ensaio.

A forma das curvas de rasgamento dos restantes geotêxteis estudados neste trabalho é semelhante à forma das curvas apresentadas para o geotêxtil B0-280, possuindo vários máximos e mínimos. Para alguns tipos de materiais (diferentes dos estudados neste trabalho), a força desenvolvida durante o ensaio de rasgamento converge para um único valor máximo.

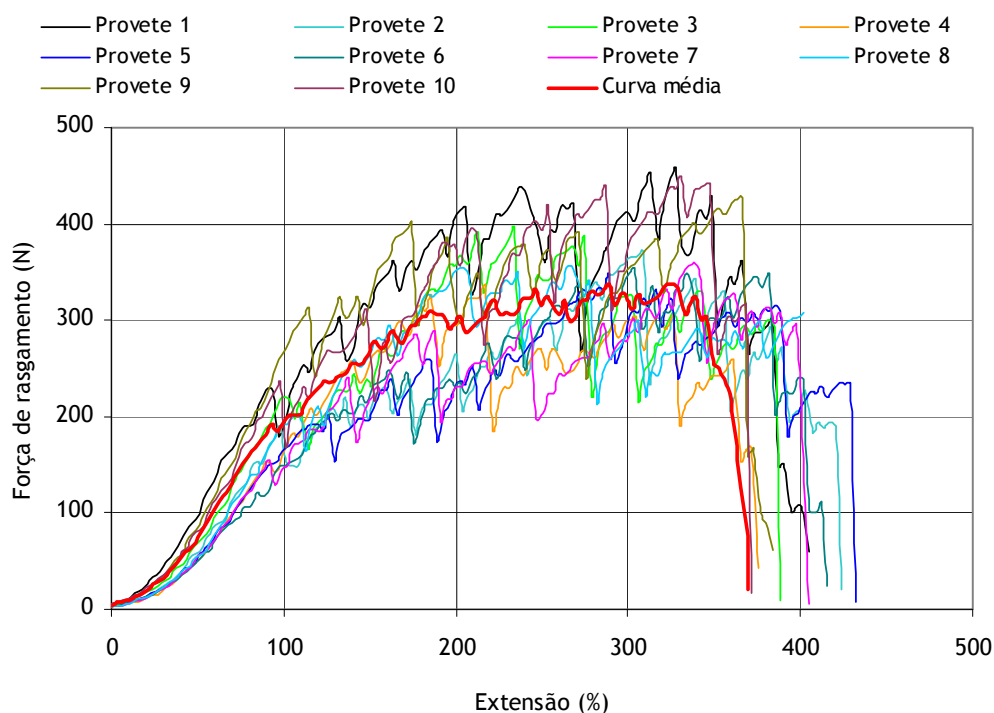


Figura 4.17 - Curvas de rasgamento individuais e curva de rasgamento média dos 10 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.

O Quadro 4.9 compara o valor da resistência ao rasgamento obtido graficamente a partir da curva média de rasgamento ( $V_{CM}$ ) com o valor obtido a partir da média dos resultados individuais de todos os provetes ensaiados ( $V_M$ ).

Quadro 4.9 - Resultado obtido no ensaio de rasgamento de 10 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valor médio *versus* valor calculado a partir da curva média.

| Geotêxtil B0-280   | Resistência ao rasgamento (N) |
|--|-------------------------------|
| $V_M$  | 385                           |
| $V_{CM}$   | 338                           |
| $\Delta = (V_M - V_{CM}) / V_M (\%)$                                   | 12,2                          |
| (V <sub>M</sub> - valor médio; V <sub>CM</sub> - valor da curva média) |                               |

A resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280 calculada a partir da curva de rasgamento média apresenta um valor inferior à resistência ao rasgamento calculada a partir da média dos valores dos provetes individuais (desvio de 12,2%). A diferença entre o  $V_M$  e o  $V_{CM}$  pode ser explicada pelo facto da curva de rasgamento média não representar fielmente o comportamento dos provetes individuais durante o ensaio.

Os valores de resistência ao rasgamento apresentados neste trabalho serão os valores calculados a partir da média dos valores individuais de todos os provetes ensaiados. Pelo motivo já indicado, não serão apresentadas as curvas de rasgamento médias.

## 4.8 - Ensaios de punçoamento estático

### 4.8.1 - Introdução

A determinação da resistência ao punçoamento estático foi efectuada de acordo com a norma NP EN ISO 12236:2008 (Geossintéticos - Ensaio de punçoamento estático (Ensaio CBR)).

A norma NP EN ISO 12236 descreve um método para a determinação da resistência ao punçoamento estático, medindo a força necessária para deslocar um pilão (designado por percussor na norma NP EN ISO 12236) de extremidade plana através de geotêxteis e produtos relacionados. Este método de ensaio pode ser aplicado à maioria dos geossintéticos, com excepção dos materiais com orifícios maiores que 10 mm.

A norma NP EN ISO 12236 foi utilizada para determinar a resistência ao punçoamento estático dos geotêxteis antes e após exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10).

### 4.8.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de punçoamento estático foi o mesmo usado para os ensaios de tracção-extensão e de rasgamento (equipamento descrito no ponto 4.5.2). Neste ensaio, e ao contrário dos ensaios anteriores, o equipamento opera em modo de compressão.

Os provetes são fixados entre duas argolas de aço (com diâmetro interno de  $150,0 \pm 0,5$  mm), que são apertadas através de 8 parafusos (Figura 4.18). As argolas não devem permitir o deslizamento dos provetes durante o ensaio nem, em nenhuma situação, causar danos nos materiais.



Figura 4.18 - Argolas usadas para a fixação dos provetes no ensaio de punçoamento estático: (a) argola inferior e argola superior; (b) argolas sobrepostas.

O pilão é um cilindro em aço inoxidável com diâmetro de  $50,0 \pm 0,5$  mm (Figura 4.19). A superfície do pilão é polida, não possuindo zonas angulosas que possam provocar cortes nos materiais. A base do pilão (que pressiona os provetes) é ligeiramente arredondada nas bordas (sem nenhum ângulo recto) para não provocar cortes nos materiais. Os provetes para o ensaio de punçoamento estático (no mínimo 5 provetes) são cortados com uma forma circular e furados para permitir a passagem dos parafusos de aperto das argolas (Figura 4.20).





Figura 4.19 - Pilão usado no ensaio de punção estático:  
(a) vista geral do pilão; (b) pormenor da base do pilão (bordas arredondadas).



Figura 4.20 - Aspecto dos provetes usados no ensaio de punção estático segundo a norma NP EN ISO 12236: (a) aspecto de um provete; (b) provete fixado entre as argolas.

O provete (fixado entre as argolas) é colocado no equipamento de ensaio (em cima de um suporte) e o pilão é deslocado até estar em contacto com o provete (mas sem efectuar qualquer pressão no mesmo). Durante o ensaio, o pilão avança através do provete (perpendicularmente ao mesmo) com uma velocidade constante de  $50 \pm 10 \text{ mm.min}^{-1}$  até ocorrer a rotura do provete. Os valores da força de pressão aplicada e do deslocamento respectivo são continuamente registados durante o ensaio. A Figura 4.21 ilustra as etapas de um ensaio de punção estático segundo a NP EN ISO 12236.

A norma NP EN ISO 12236 sugere que devem ser rejeitados todos os provetes que possuam uma força de punção máxima que seja 50% inferior ao valor médio dos restantes provetes ensaiados. Os provetes que deslizarem nas argolas ou que apresentarem roturas muito próximas das argolas (muito possivelmente devido a danos causados pelas próprias argolas) também devem ser rejeitados.

Os resultados obtidos a partir de um ensaio de punção estático incluem normalmente o valor médio da força de punção máxima (resistência ao punção) (em kN) e o valor médio do deslocamento na força máxima registada (em mm) para o conjunto de provetes ensaiados, bem como os respectivos desvios padrão e/ou coeficientes de variação. Além destes resultados, pode também ser apresentada a curva média força-deslocamento para o conjunto de provetes ensaiados.

A resistência ao punçoamento dos geossintéticos após a exposição aos vários agentes de degradação pode ser expressa em termos de resistência residual (em %), obtida através da divisão da resistência ao punçoamento dos provetes expostos pela resistência ao punçoamento dos provetes de referência.

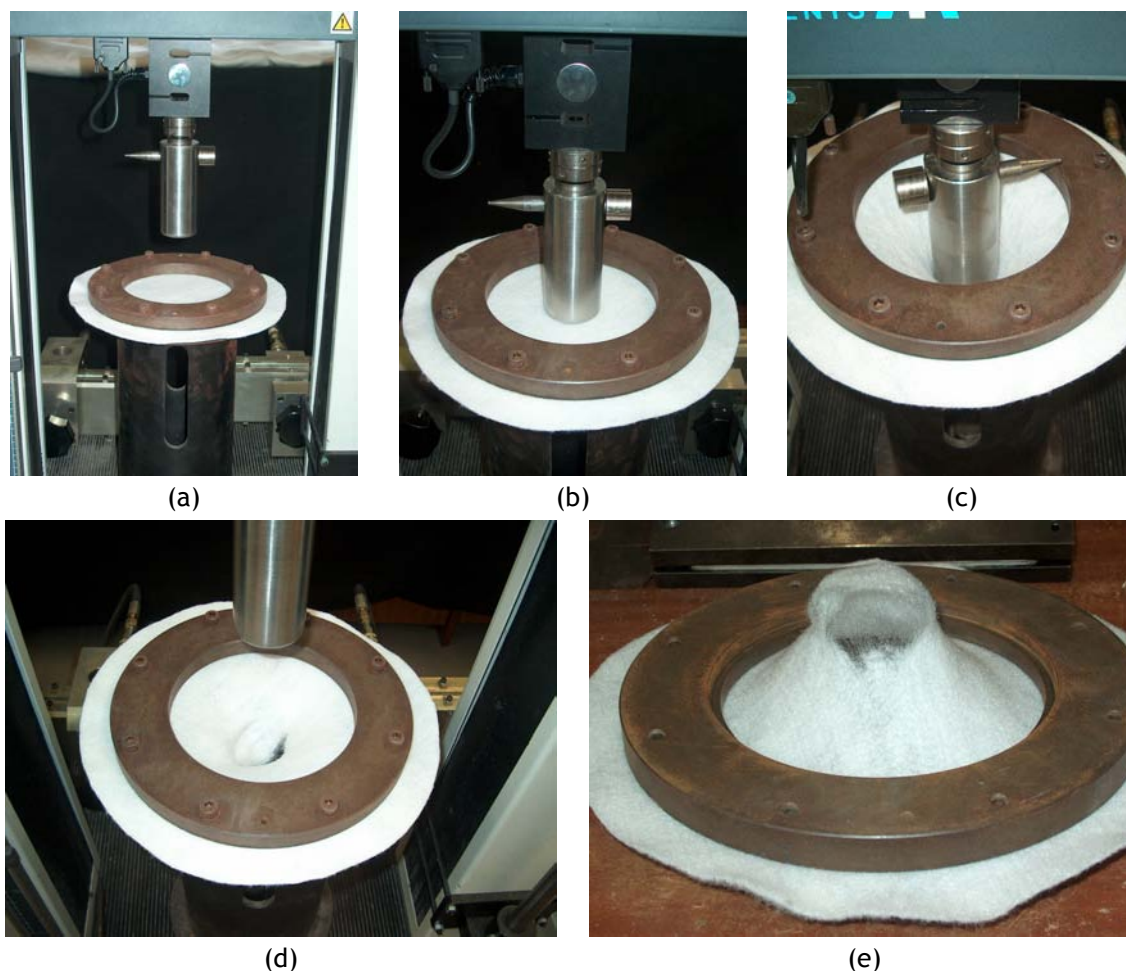


Figura 4.21 - Ensaio de punçoamento estático de um geotêxtil segundo a norma NP EN ISO 12236: (a) antes do ensaio; (b) início do ensaio; (c) durante o ensaio; (d) final do ensaio; (e) aspecto do provete após o ensaio.

#### 4.8.3 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de punçoamento estático de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280. Os valores das resistências ao punçoamento estático e dos respectivos deslocamentos na força máxima de cada um dos provetes ensaiados encontram-se resumidos no Quadro 4.10. A partir dos resultados dos 5 provetes individuais, foram determinados os valores médios correspondentes, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

A resistência ao punçoamento estático do geotêxtil B0-280 possui um valor médio de 1,46 kN (com um coeficiente de variação de 12%), enquanto que o correspondente deslocamento na força máxima apresenta um valor de 73,0 mm (coeficiente de variação de 6,4%). As curvas força-deslocamento individuais, bem como a curva força-deslocamento média dos 5 provetes ensaiados, encontram-se representadas na Figura 4.22.



Quadro 4.10 - Resultados obtidos no ensaio de punção estático de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Provete                     | Resistência ao punção (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1                           | 1,62                       | 67,2                              |
| 2                           | 1,50                       | 72,8                              |
| 3                           | 1,37                       | 80,3                              |
| 4                           | 1,60                       | 71,4                              |
| 5                           | 1,20                       | 73,5                              |
| Valor médio                 | 1,46                       | 73,0                              |
| Desvio padrão               | 0,17                       | 4,7                               |
| Coeficiente de variação (%) | 12                         | 6,4                               |

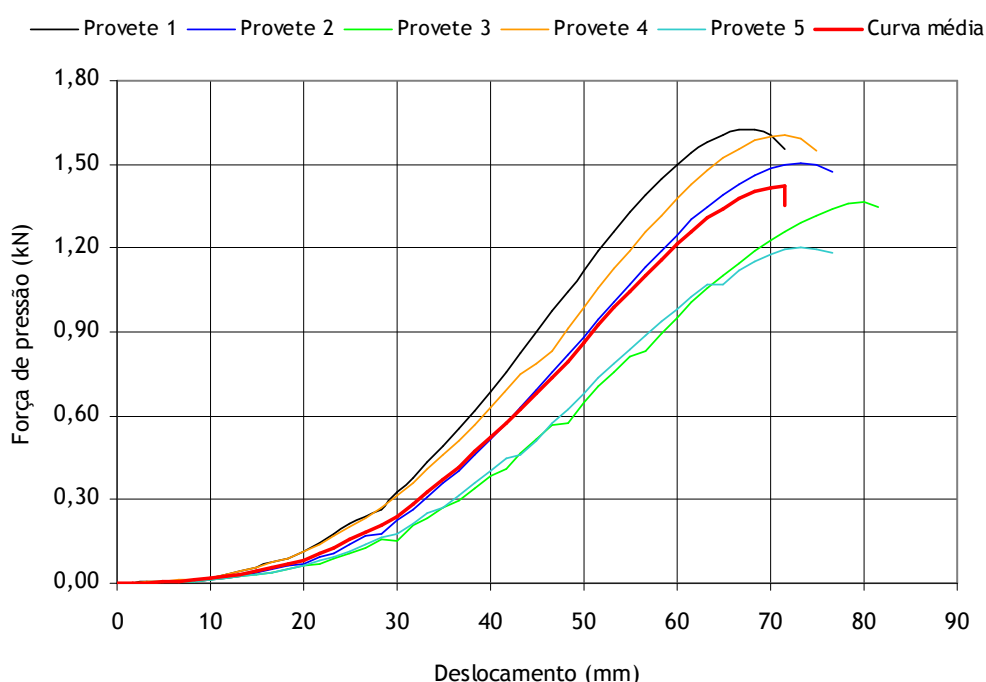


Figura 4.22 - Curvas força-deslocamento individuais e curva força-deslocamento média dos 5 provetes ensaiados do geotêxtil B0-280.

Os valores da resistência ao punção estático e do respectivo deslocamento na força máxima também podem ser obtidos a partir da curva média força-deslocamento. No entanto, os valores determinados a partir da curva média força-deslocamento nem sempre coincidem exactamente com os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais dos provetes ensaiados. O Quadro 4.11 compara os valores obtidos graficamente a partir da curva média força-deslocamento ( $V_{CM}$ ) com os valores obtidos pela média dos resultados individuais de cada provete ( $V_M$ ).

Os  $V_M$  e  $V_{CM}$  da resistência ao punção estático e do respectivo deslocamento na força máxima são muito semelhantes (desvio de 2,7% para a resistência ao punção estático e desvio de 1,9% para o deslocamento na força máxima). Apesar disso, todos os valores apresentados neste trabalho da resistência ao punção e do deslocamento na força máxima serão sempre os valores obtidos directamente a partir da média dos resultados individuais de todos os provetes ensaiados.

Quadro 4.11 - Resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280: valores médios *versus* valores calculados a partir da curva média.

| Geotêxtil B0-280                    | Resistência ao punçoamento (kN) | Deslocamento na força máxima (N) |
|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| $V_M$                               | 1,46                            | 73,0                             |
| $V_{CM}$                            | 1,42                            | 71,6                             |
| $\Delta = (V_M - V_{CM}) / V_M$ (%) | 2,7                             | 1,9                              |

( $V_M$  - valor médio;  $V_{CM}$  - valor da curva média)

## 4.9 - Ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano

### 4.9.1 - Introdução

A permeabilidade dos geotêxteis à água (com um fluxo de água normal ao plano) foi determinada de acordo com a norma NP EN ISO 11058:2003 (Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento). A norma NP EN ISO 11058 foi utilizada para determinar a permeabilidade dos geotêxteis antes e após a exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10).

A norma NP EN ISO 11058 especifica dois métodos de ensaio para a determinação da permeabilidade à água normal ao plano de geotêxteis ou de produtos relacionados: método de carga constante ou método de carga variável. No método de carga constante (usado neste trabalho), os geotêxteis são submetidos a um fluxo unidireccional de água (fluxo normal ao plano dos materiais) sob uma série de cargas hidráulicas constantes.

### 4.9.2 - Descrição do ensaio: equipamento, método e resultados obtidos

O equipamento usado nos ensaios de determinação da permeabilidade à água (normal ao plano) dos geotêxteis foi desenvolvido no LGS da FEUP (Figura 4.23 e Figura 4.24). O equipamento possui um diâmetro interno de 83,5 mm na zona onde os provetes são instalados. Para evitar deformações nos provetes (provocadas pelo fluxo de água) foi colocada (a jusante do provete) uma grelha de arame com uma malha de aproximadamente  $10 \pm 1$  mm. A velocidade de escoamento de água do sistema não é afectada pela inclusão desta grelha.

O equipamento não deve ser alimentado directamente com água da rede pública devido a eventuais problemas resultantes da formação de bolhas de ar (que poderão ficar bloqueadas na estrutura dos provetes). Assim, foi utilizada água proveniente de um reservatório de descanso (a temperatura da água deve estar compreendida entre os 18 e os 22 °C). A água do reservatório deve ser substituída (ou então filtrada) sempre que sejam visíveis sólidos em suspensão (os sólidos em suspensão podem acumular-se nos provetes, reduzindo o escoamento de água ao longo do tempo).

Os provetes (mínimo 5 provetes) foram cortados com forma circular (diâmetro total de 131 mm) e foi determinada a sua espessura (através da norma NP EN ISO 9863-1, ponto 4.4). Em seguida, foram imersos em água durante pelo menos 12 horas (período de saturação). O diâmetro útil dos provetes (parte dos provetes exposta ao fluxo unidireccional de água) é de 83,5 mm (diâmetro definido pelo diâmetro interno do equipamento), o que perfaz uma área de exposição total de 5476 mm<sup>2</sup>.

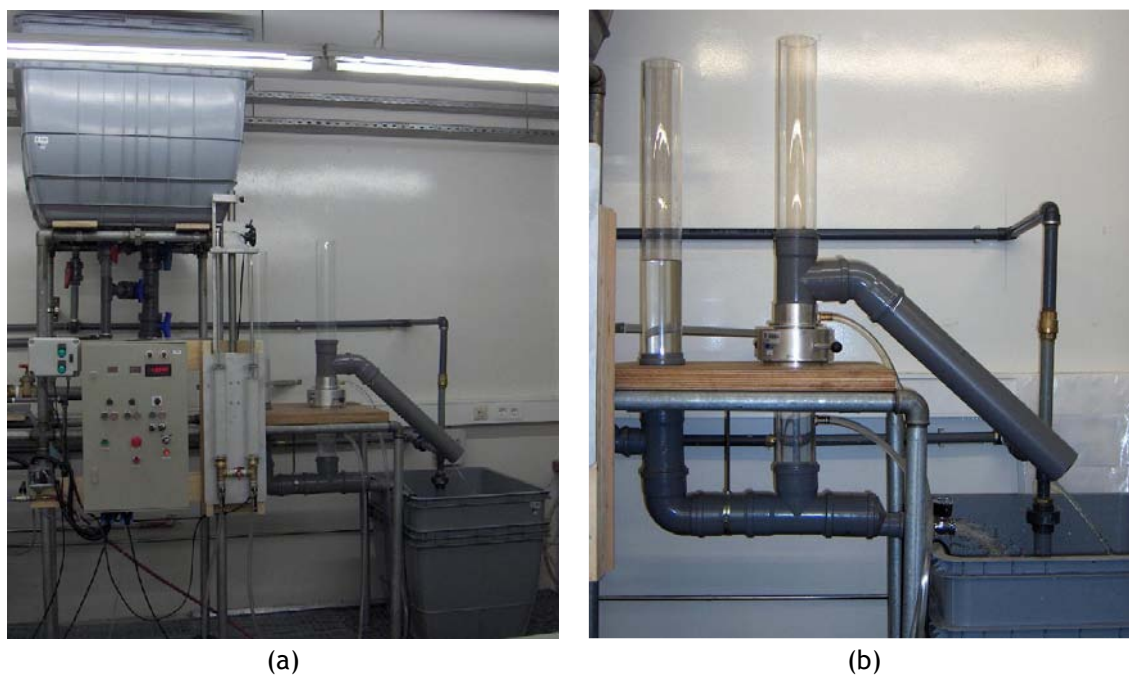


Figura 4.23 - Equipamento protótipo usado para a determinação da permeabilidade à água (normal ao plano): (a) vista geral do equipamento; (b) pormenor de uma parte do equipamento.

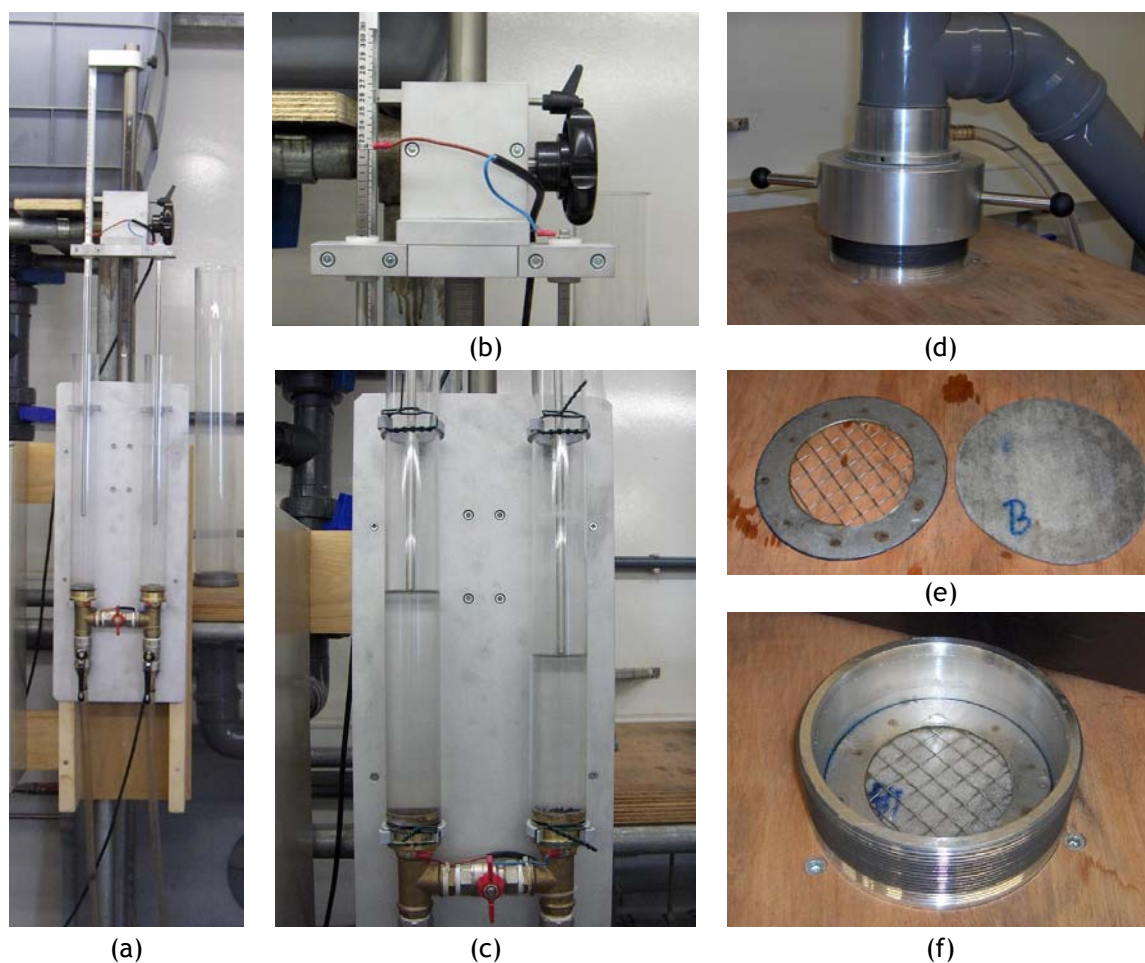


Figura 4.24 - Equipamento protótipo usado para a determinação da permeabilidade à água (normal ao plano): (a), (b) e (c) sistema de medição e controlo da perda de carga hidráulica; (d) local de colocação dos provetes; (e) suporte em arame e um provete; (f) provete colocado no equipamento.

O provete (saturado em água) foi colocado no equipamento e o fluxo de água foi ajustado até obter uma diferença de carga hidráulica de 70 mm através do provete. Após a carga hidráulica aplicada se manter estável por um período mínimo de 30 segundos, procedeu-se à recolha da água que passa pelo sistema durante um dado intervalo de tempo (procedimento realizado em triplicado). O volume de água recolhido foi determinado por pesagem (balança de marca *AND*, modelo *GF 3000-EC*, com uma precisão de 0,01 g) e o tempo de recolha foi medido com um cronómetro (precisão de 0,01 s). A temperatura da água foi também registada (termómetro com precisão de 0,1 °C).

O procedimento anterior (ainda com o mesmo provete instalado no equipamento) foi repetido para quatro valores mais baixos de perda de carga hidráulica: 56, 42, 28 e 14 mm (ensaios realizados da perda de carga mais alta para a perda de carga mais baixa). Após a exposição às 5 perdas de carga, o provete foi removido do equipamento e foram sucessivamente ensaiados os restantes provetes.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade à água (normal ao plano) dos geotêxteis normalmente incluem os valores médios das velocidades de escoamento  $v_{20}$  para cada uma das perdas de carga hidráulica, bem como os respectivos desvios padrão e/ou coeficientes de variação.

A velocidade de escoamento à temperatura de 20 °C,  $v_{20}$  (expressa em mm.s<sup>-1</sup>), pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$v_{20} = \frac{V \times R_T}{A \times t} \quad (4.9)$$

em que,  $V$  é o volume de água recolhido (em mm<sup>3</sup>),  $R_T$  é um factor de correcção para a temperatura da água,  $T$  é a temperatura da água (em °C),  $A$  é a área exposta do provete (em mm<sup>2</sup>) e  $t$  é o tempo (em s) registado durante a recolha do volume de água  $V$ . O factor de correcção  $R_T$  para uma dada temperatura  $T$  (em °C) pode ser determinado da seguinte forma:

$$R_T = \frac{1,762}{1 + 0,0337T + 0,00022T^2} \quad (4.10)$$

A perda de carga hidráulica ( $H$ ) e a velocidade de escoamento  $v_{20}$  podem ser relacionadas através da seguinte expressão quadrática:

$$H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2 \quad (4.11)$$

Assim, a representação gráfica da perda de carga  $H$  em função da velocidade de escoamento  $v_{20}$  é normalmente usada para determinar (matematicamente ou por interpolação gráfica) a velocidade de escoamento para uma perda de carga de 50 mm ( $v_{20} H50$ ) (as curvas de regressão quadrática são ajustadas de modo a passarem na origem).

Os resultados do ensaio de permeabilidade à água normal ao plano podem também ser expressos em termos de permissividade ( $\Psi$ ). A permissividade (em s<sup>-1</sup>) pode ser calculada dividindo a velocidade de escoamento  $v_{20}$  (em mm.s<sup>-1</sup>) pela perda de carga hidráulica  $H$  (em mm); através da multiplicação da permissividade (em s<sup>-1</sup>) pela espessura (em mm) é possível obter o coeficiente de permeabilidade normal ao plano, ( $K_N$ ) (em mm.s<sup>-1</sup>), do material ensaiado.

### 4.9.3 - Resultados de um ensaio tipo

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280. Os dados experimentais recolhidos para um provete do geotêxtil B0-280, bem como as velocidades de escoamento  $v_{20}$  obtidas para as diferentes perdas de carga  $H$ , encontram-se resumidos no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Dados experimentais recolhidos e velocidades de escoamento  $v_{20}$  obtidas no ensaio de permeabilidade à água (normal ao plano) de um provete intacto do geotêxtil B0-280.

| Perda de carga (mm) | Massa de água (g) | Tempo (s) | Temperatura da água (°C) | $v_{20}$ (mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ média (mm.s <sup>-1</sup> ) | CV (%) |
|---------------------|-------------------|-----------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------|
| 70                  | 2477,29           | 3,67      | 19,0                     | 126                            | 127                                  | 0,8    |
|                     | 2525,47           | 3,75      | 19,0                     | 126                            |                                      |        |
|                     | 2445,56           | 3,58      | 19,0                     | 128                            |                                      |        |
| 56                  | 2643,39           | 4,44      | 19,0                     | 111                            | 112                                  | 0,5    |
|                     | 2672,55           | 4,47      | 19,0                     | 113                            |                                      |        |
|                     | 2611,34           | 4,34      | 19,0                     | 112                            |                                      |        |
| 42                  | 2582,95           | 5,34      | 19,0                     | 90,5                           | 90,9                                 | 0,7    |
|                     | 2721,03           | 5,56      | 19,0                     | 91,6                           |                                      |        |
|                     | 2720,45           | 5,63      | 19,0                     | 90,4                           |                                      |        |
| 28                  | 2486,17           | 7,06      | 19,0                     | 65,9                           | 65,7                                 | 0,5    |
|                     | 2530,91           | 7,25      | 19,0                     | 65,3                           |                                      |        |
|                     | 2680,59           | 7,63      | 19,0                     | 65,8                           |                                      |        |
| 14                  | 2644,90           | 13,87     | 19,0                     | 35,7                           | 35,7                                 | 0,2    |
|                     | 2568,91           | 13,47     | 19,0                     | 35,7                           |                                      |        |
|                     | 2584,13           | 13,51     | 19,0                     | 35,8                           |                                      |        |

(a 19,0 °C, o factor de correcção  $R_T$  possui o valor de 1,025)

(CV - coeficiente de variação)

O Quadro 4.13 resume os valores das velocidades de escoamento  $v_{20}$  às diferentes perdas de carga  $H$  para cada um dos provetes intactos do geotêxtil B0-280, bem como os respectivos valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação. A Figura 4.25 ilustra as curvas de regressão quadrática obtidas para cada um dos provetes intactos do geotêxtil B0-280.

Quadro 4.13 - Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano de 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Proвете       | $v_{20}$ H70 (mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H56 (mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H42 (mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H28 (mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H14 (mm.s <sup>-1</sup> ) |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 127                                | 112                                | 90,9                               | 65,7                               | 35,7                               |
| 2             | 123                                | 107                                | 86,5                               | 65,1                               | 34,5                               |
| 3             | 144                                | 124                                | 98,7                               | 73,6                               | 41,1                               |
| 4             | 142                                | 118                                | 94,7                               | 65,1                               | 38,2                               |
| 5             | 126                                | 109                                | 86,0                               | 61,4                               | 33,3                               |
| Valor médio   | 132                                | 114                                | 91,4                               | 66,2                               | 36,6                               |
| Desvio padrão | 10                                 | 7                                  | 5,4                                | 4,5                                | 3,1                                |
| CV (%)        | 7,4                                | 6,1                                | 5,9                                | 6,8                                | 8,5                                |

(CV - coeficiente de variação)

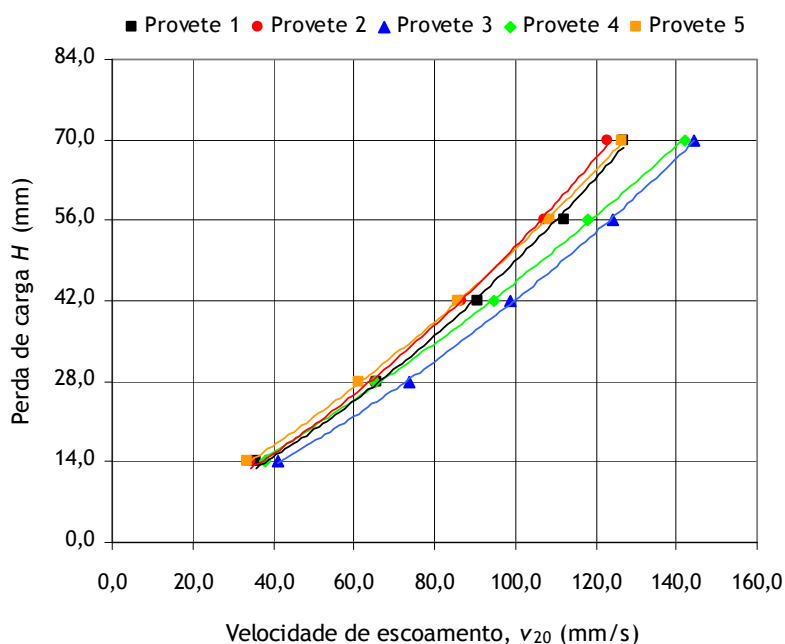


Figura 4.25 - Curvas de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  obtidas para cada um dos provetes intactos do geotêxtil B0-280.

Os parâmetros das curvas de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$ , as  $v_{20} H50$  e as permissividades obtidas para cada um dos provetes intactos do geotêxtil B0-280, bem como os respectivos valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação, encontram-se resumidos no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 - Parâmetros das curvas de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$ , velocidades de escoamento para uma perda de carga de 50 mm e permissividades dos 5 provetes intactos do geotêxtil B0-280.

| Provete       | $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$ |                    |                | $v_{20} H50^*$<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $\Psi H50$<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|---------------|-------------------------------|--------------------|----------------|---|----------------------------------|
|               | 10.a                          | 10 <sup>3</sup> .b | R <sup>2</sup> |   |                                  |
| 1             | 2,92                          | 1,96               | 0,9974         | 102                                     | 2,04                             |
| 2             | 2,99                          | 2,16               | 0,9988         | 97,9                                    | 1,96                             |
| 3             | 2,80                          | 1,42               | 0,9996         | 114                                     | 2,28                             |
| 4             | 3,52                          | 1,00               | 0,9990         | 109                                     | 2,18                             |
| 5             | 3,58                          | 1,52               | 0,9990         | 98,5                                    | 1,97                             |
| Valor médio   | ---                           | ---                | ---            | 104                                     | 2,09                             |
| Desvio padrão | ---                           | ---                | ---            | 7                                       | 0,14                             |
| CV (%)        | ---                           | ---                | ---            | 6,7                                     | 6,7                              |

(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$ )

A  $v_{20} H50$  do geotêxtil B0-280 possui um valor médio de 104 mm.s<sup>-1</sup> (com um coeficiente de variação de 6,7%), enquanto que a permissividade para uma perda de carga  $H$  de 50 mm ( $\Psi H50$ ) possui um valor médio de 2,09 s<sup>-1</sup> (coeficiente de variação de 6,7%).

Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade à água (normal ao plano) dos geotêxteis serão expressos em termos de: (1) velocidades de escoamento  $v_{20}$  ( $v_{20} H70$ ,  $v_{20} H56$ ,  $v_{20} H42$ ,  $v_{20} H28$  e  $v_{20} H14$ ) (valores obtidos pela média dos provetes individuais), (2)  $v_{20} H50$  (média dos valores calculados através das expressões quadráticas do tipo  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$  de cada um dos provetes individuais),

(3)  $\Psi_{H50}$  (média dos valores obtidos pela divisão da  $v_{20\ H50}$  de cada um dos provetes individuais pela perda de carga) e (4) curvas médias de regressão quadrática (obtidas através da representação gráfica da perda de carga  $H$  em função das velocidades de escoamento  $v_{20}$  médias).

#### 4.10 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X

As análises dos geotêxteis por MEV e por espectroscopia de raio X (análise elementar do carbono até ao urânio) foram realizadas no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). Os principais fundamentos teóricos da MEV e da microanálise por raio X foram descritos no ponto 3.6.2.

O microscópio electrónico usado (marca *Jeol*, modelo *JSM 6301F*) estava equipado com um detector de electrões secundários, com um detector de electrões retrodifundidos e com um espectrómetro de raio X. As microanálises por raio X foram efectuadas no espectrómetro “*EDS Noran Voyager*” ou no espectrómetro “*EDS Oxford Inca Energy 350*” (marca *Oxford Instruments*). A Figura 4.26 ilustra o microscópio electrónico de varrimento do CEMUP usado neste trabalho.

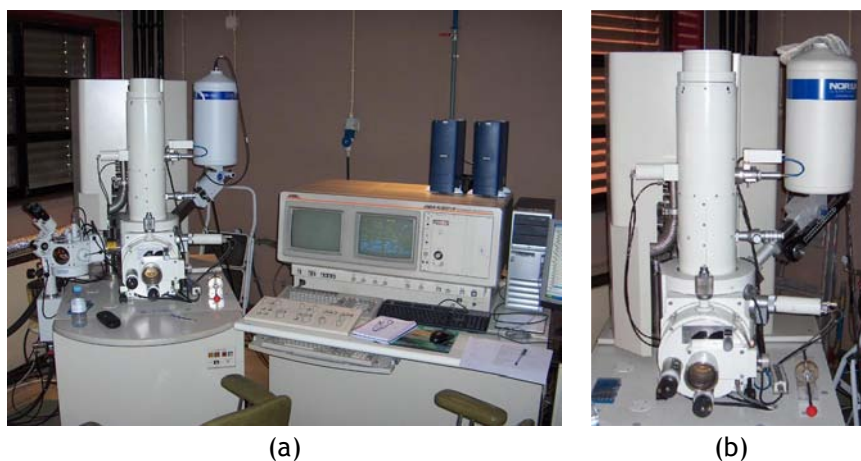


Figura 4.26 - Microscópio electrónico de varrimento usado neste trabalho: (a) vista geral do microscópio; (b) pormenor da parte principal do microscópio.

As amostras (com área máxima de 1 cm<sup>2</sup>) foram coladas em suportes metálicos através de uma fita adesiva de carbono. Em seguida, as amostras foram revestidas com uma camada de ouro muito fina (para ficarem electricamente condutoras) e foram electricamente ligadas à terra (de modo a evitar a acumulação de carga eléctrica na sua superfície). O revestimento das amostras com a camada de ouro foi efectuado num equipamento de marca *Jeol*, modelo *Fine Coat Ion Sputter JFC-1100* (Figura 4.27). A Figura 4.28 ilustra algumas amostras preparadas para MEV e para microanálise por raio X.

As imagens microscópicas foram obtidas com diferentes ampliações (de um modo geral, entre 10 e 5000 vezes). O número de imagens obtidas para cada um dos geotêxteis (antes e após exposição aos diferentes ensaios de durabilidade) foi muito elevado. Assim, serão apenas apresentadas as imagens mais representativas e com ampliações semelhantes (para permitir uma melhor comparação entre os vários tipos de materiais após os vários ensaios de durabilidade).

As imagens de MEV apresentadas ao longo deste trabalho foram obtidas com o detector de electrões secundários (salvo excepções assinaladas). A Figura 4.29 ilustra uma imagem tipo obtida por MEV.





(a)



(b)

Figura 4.27 - Equipamento usado para o revestimento das amostras com ouro:  
(a) vista geral do equipamento; (b) pormenor da cápsula de revestimento.



(a)



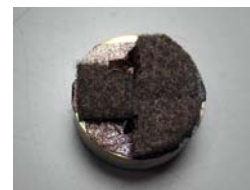
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.28 - Amostras dos geotêxteis para MEV e para microanálise por raio X:  
(a) vários amostradores; (b) amostrador com um geotêxtil; (c) amostrador com pó e fibras libertadas por um geotêxtil degradado; amostrador antes (d) e após (e) o revestimento.

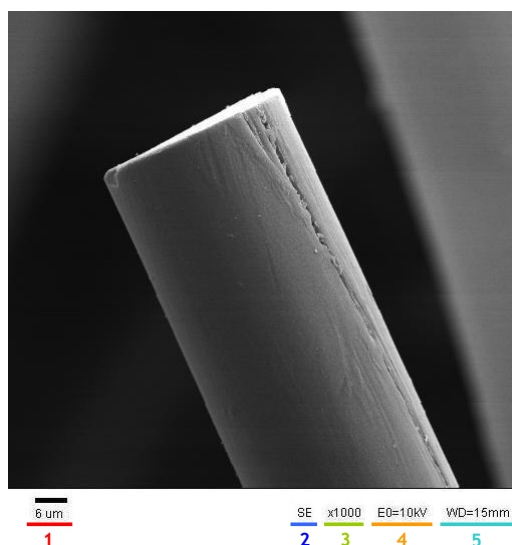


Figura 4.29 - Imagem obtida por MEV de uma fibra de PP: (1) barra de escala;  
(2) tipo de imagem (SE - electrões secundários, BE - electrões retrodifundidos); (3) ampliação;  
(4) energia do feixe de electrões ( $E_0$ ); (5) distância de trabalho da lente à amostra (WD).



A caracterização dos geotêxteis por MEV e por microanálise por raio X foi efectuada antes e após os seguintes ensaios de durabilidade: imersão em líquidos (Capítulo 6), termo-oxidação pelo método do forno (Capítulo 7), termo-oxidação através do novo método com elevada pressão de  $O_2$  (Capítulo 8), exposição aos agentes climáticos artificiais (Capítulo 9) e exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10) (dado o elevado número de ensaios de durabilidade, não foi possível analisar todos os materiais expostos por MEV e por microanálise por raio X).

#### 4.11 - Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR, do inglês *Fourier transform infrared spectroscopy*) foi usada para avaliar o grau de foto-degradação de alguns geotêxteis (esta técnica foi utilizada unicamente para avaliar os danos existentes nas fibras de PP após a exposição aos agentes climáticos simulados em laboratório - Capítulo 9). Os principais fundamentos teóricos da técnica de FTIR foram resumidamente descritos no ponto 3.6.3.

As fibras de PP (cerca de 5 mg de massa total) foram removidas dos geotêxteis (fibras removidas da zona directamente exposta aos agentes climáticos artificiais) e foram prensadas mecanicamente para obter pastilhas translúcidas. Em seguida, as pastilhas foram analisadas num espectrómetro de infravermelho (marca *Perkin-Elmer*, modelo *Spectrum RXI FT-IR system*) (Figura 4.30). Os espectros de FTIR foram obtidos com uma resolução de  $2\text{ cm}^{-1}$  no intervalo de números de onda compreendido entre os  $450$  e os  $4400\text{ cm}^{-1}$ .



Figura 4.30 - Espectrómetro de infravermelho: (a) vista geral; (b) suporte para as pastilhas.

O grau de foto-degradação das fibras de PP foi avaliado pela comparação dos espectros obtidos para as amostras degradadas com os espectros obtidos para as amostras intactas. As eventuais alterações químicas ocorridas nas fibras de PP durante a exposição aos agentes climáticos artificiais poderão provocar alterações nos espectros de FTIR (por exemplo, aumento ou diminuição da intensidade de bandas ou o aparecimento de novas bandas). A Figura 4.31 ilustra um espectro de FTIR obtido para as fibras do geotêxtil B2-500 (fibras não degradadas) (os intervalos de números de onda de absorção característicos no infravermelho de algumas ligações químicas encontram-se assinalados a azul).

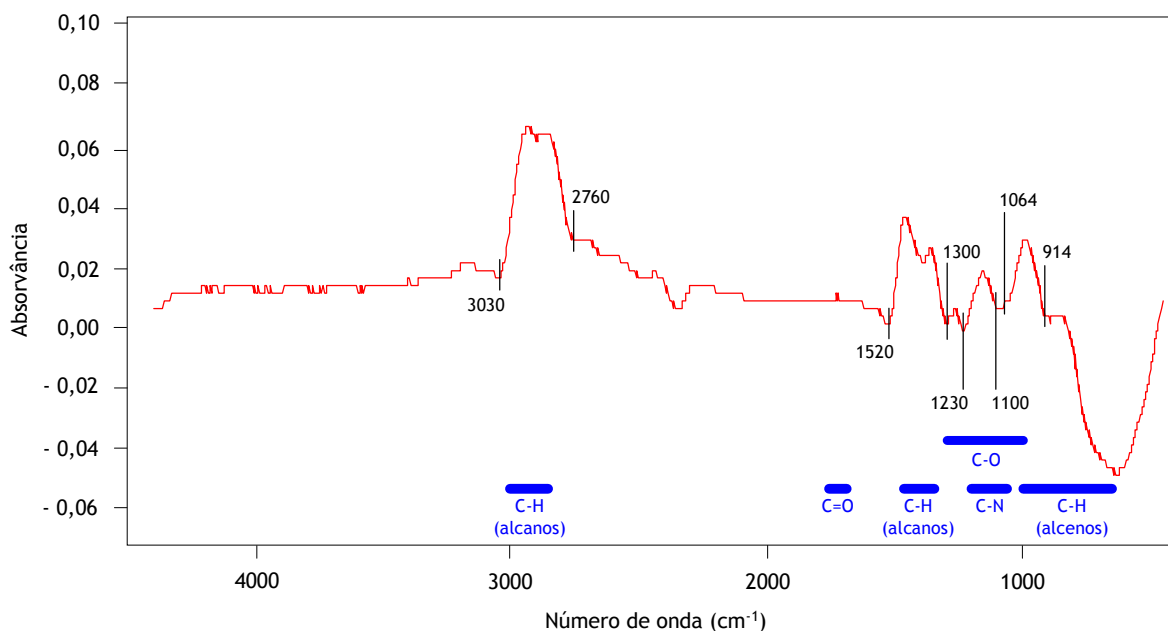


Figura 4.31 - Espectro de FTIR obtido para as fibras do geotêxtil B2-500 (fibras intactas).

## 4.12 - Determinação do aditivo Chimassorb 944 por HPLC-UV

### 4.12.1 - Introdução

Neste trabalho, foi desenvolvido um método para a determinação do aditivo C944 nos geotêxteis de PP. A metodologia desenvolvida pode ser dividida em duas etapas principais: (1) remoção do aditivo das fibras dos geotêxteis através de uma extracção por ultra-sons; (2) determinação quantitativa do aditivo por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção espectrofotométrica na região UV (HPLC-UV); uma breve introdução às técnicas cromatográficas pode ser encontrada no ponto 3.6.4.

O método desenvolvido foi utilizado para monitorizar o teor de C944 durante a exposição de alguns geotêxteis aos agentes climáticos artificiais (Capítulo 9) e aos agentes climáticos reais (Capítulo 10). Em seguida, procede-se à descrição do método desenvolvido para a determinação do C944 nos geotêxteis de PP.

### 4.12.2 - Método de determinação do Chimassorb 944 em geotêxteis de PP

Os geotêxteis foram cortados e foram pesados (massa de  $1,0000 \pm 0,0050$  g) numa balança analítica (marca *Mettler*, modelo *AE50*, precisão de 0,0001 g). Após a pesagem, as amostras foram colocadas em ampolas de vidro, foram adicionados 20,00 mL de clorofórmio e as ampolas foram fechadas. Em seguida, as ampolas foram colocadas num banho de ultra-sons (marca *Bandelin Electronic*, modelo *Sonorex TK52*, 35 kHz) durante 60 minutos a 60 °C. Após arrefecimento, os extractos de clorofórmio foram filtrados (filtro de *nylon*, diâmetro dos poros de 0,45 µm) e analisados por HPLC-UV (o volume de amostra injectado no sistema cromatográfico foi de 20 µL). A Figura 4.32 ilustra os vários passos do método de determinação do C944 em geotêxteis.

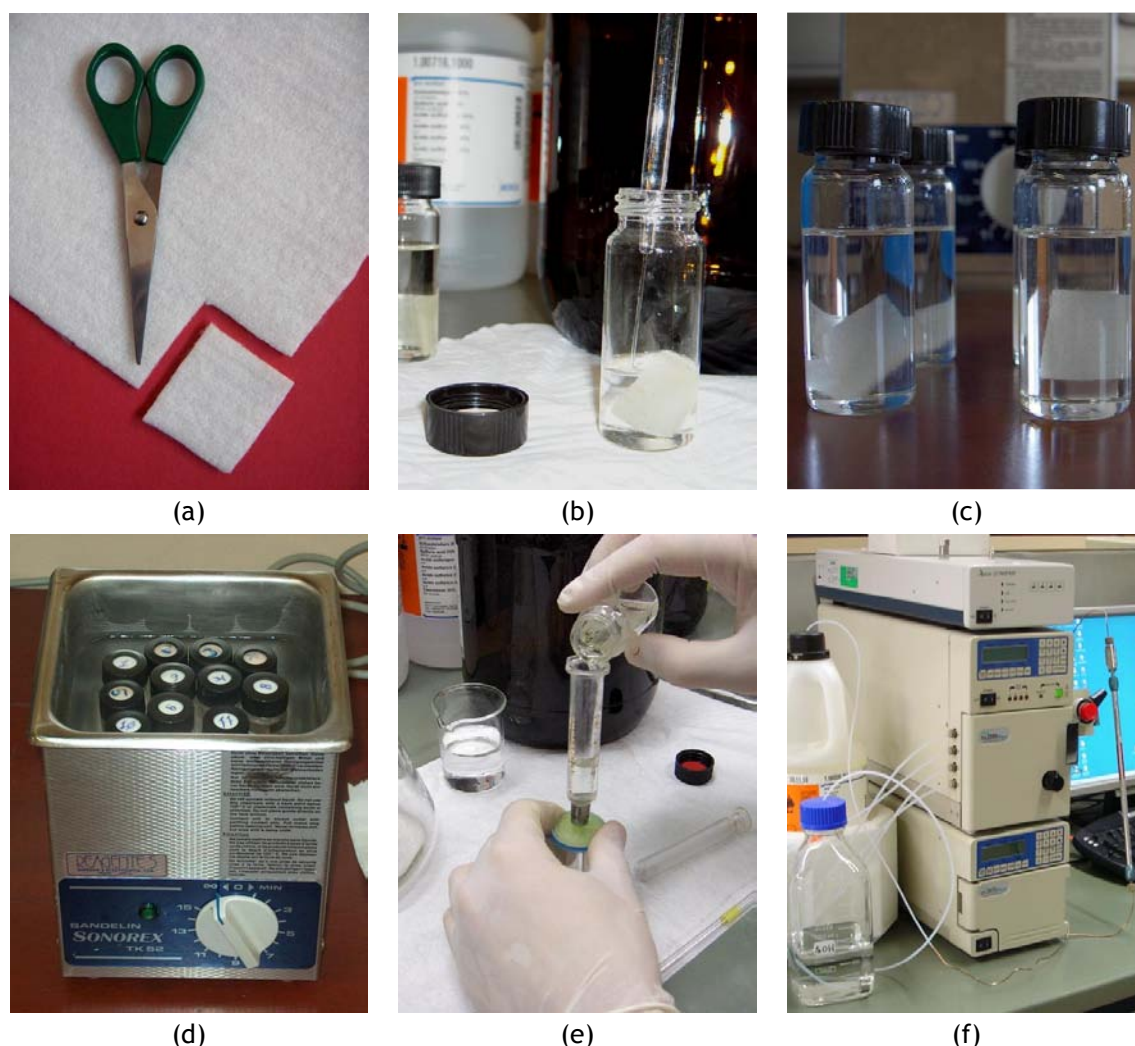


Figura 4.32 - Método desenvolvido para a determinação do aditivo C944 nos geotêxteis: (a) corte das amostras dos geotêxteis; (b) adição de clorofórmio; (c) ampolas antes da extracção por ultra-sons; (d) banho de ultra-sons; (e) filtração dos extractos de clorofórmio; (f) sistema cromatográfico.

As análises por HPLC-UV foram realizadas num cromatógrafo formado pelos seguintes equipamentos: bomba de gradiente quaternária *Jasco*, modelo *PU-2089 Plus*; válvula de injeção *Rheodyne*, modelo *7725(i)* (volume do *loop*: 20  $\mu\text{L}$ ); detector UV-VIS *Jasco*, modelo *UV-2070 Plus*; caixa de interface *Jasco*, modelo *LC-Net III/ADC*. As principais características da pré-coluna e da coluna usadas para a separação do C944 encontram-se resumidas no Quadro 4.15.

Quadro 4.15 - Principais características da pré-coluna e da coluna usadas nos ensaios de HPLC-UV para a separação do C944.

| Características         | Pré-coluna<br>Kromasil 100-5NH <sub>2</sub> | Coluna<br>Kromasil 100-5NH <sub>2</sub> |
|-------------------------|---|---|
| Fabricante              | <i>HiChrom</i>                              | <i>HiChrom</i>                          |
| Comprimento             | 10 mm                                       | 250 mm                                  |
| Diâmetro interno        | 4 mm  | 4,6 mm                                  |
| Tamanho dos poros       | 100 Å                                       | 100 Å                                   |
| Diâmetro das partículas | 5 $\mu\text{m}$                             | 5 $\mu\text{m}$                         |

A eluição do C944 na coluna  $\text{NH}_2$  (fase estacionária) foi realizada com clorofórmio (fase móvel) a um fluxo constante de  $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nestas condições, o C944 possui um tempo de retenção de cerca de 5 minutos. O C944 foi detectado ao comprimento de onda de 244 nm (a sensibilidade é suficiente para quantificação, o sinal cromatográfico do C944 está bem definido e não existem interferências muito significativas de outros compostos).

A Figura 4.33 ilustra os cromatogramas obtidos para três geotêxteis especialmente fabricados com diferentes quantidades de C944: geotêxtil B0-500 (sem C944); geotêxtil B2-500 (com 0,2% de C944) e geotêxtil B4-500 (com 0,4% de C944) (as principais características destes geotêxteis encontram-se descritas detalhadamente no Capítulo 5).

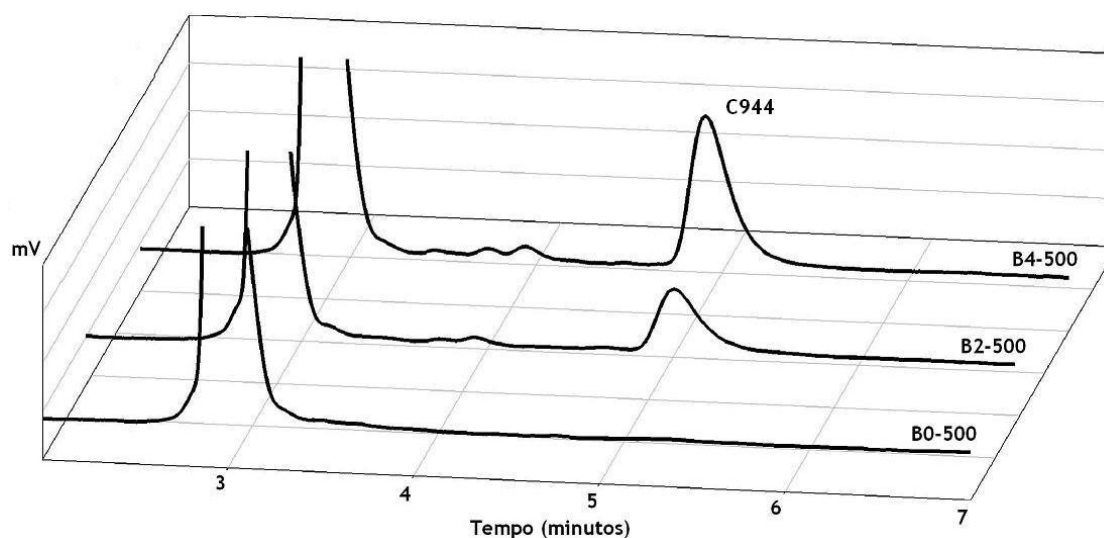


Figura 4.33 - Cromatogramas obtidos para os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500.

Os cromatogramas dos geotêxteis B2-500 e B4-500 possuíam um sinal cromatográfico com um tempo de retenção de cerca de 5 minutos (sinal cromatográfico inexistente no cromatograma do geotêxtil sem C944) que apenas pode ser atribuído ao C944; a análise de soluções padrão de C944 preparadas em clorofórmio também origina o aparecimento de um sinal cromatográfico aos 5 minutos (sinal que aumenta com o aumento da concentração de C944). O sinal do C944 no cromatograma do geotêxtil B4-500 possuía cerca do dobro da área do sinal do C944 no cromatograma do geotêxtil B2-500 (o que mostra a existência de uma proporcionalidade com a concentração de C944 presente nos materiais) (Quadro 4.16). O sinal existente no início dos três cromatogramas (com um tempo de retenção de cerca de 2,8 minutos) é devido à fase móvel (e a outros compostos extraídos dos geotêxteis) e não afecta a determinação quantitativa do C944.

Quadro 4.16 - Áreas e tempos de retenção do C944 obtidos na análise dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 por HPLC-UV.

| Geotêxtil | Área do sinal do C944 (mV.min) | Tempo de retenção (minutos) |
|-----------|--------------------------------|-----------------------------|
| B0-500    | ND (não detectado)             | ---                         |
| B2-500    | 0,689                          | 5,168                       |
| B4-500    | 1,529                          | 5,043                       |

O C944 usado para a preparação de soluções padrão foi gentilmente cedido pela Ciba (empresa que produz o aditivo). O clorofórmio (marca *Merck*) possuía qualidade para cromatografia líquida.

O método desenvolvido para a determinação do C944 em geotêxteis de PP é simples, de baixo custo e relativamente rápido (10 amostras podem ser analisadas em cerca de 4 horas).

#### 4.12.3 - Quantificação do Chimassorb 944 nos geotêxteis de PP

A concentração de C944 existente nos geotêxteis B2-500 e B4-500 foi determinada por dois métodos diferentes: (1) método da curva de calibração (usando padrões externos de C944) (método A) e (2) método de quantificação usando diferentes massas do geotêxtil B4-500 e admitindo a concentração definida pelo fabricante como exacta (método B).

No método A, a curva de calibração foi construída através da análise de soluções padrão com várias concentrações de C944 (soluções preparadas em clorofórmio). A relação obtida entre a área do sinal cromatográfico e a concentração do C944 é linear ( $r^2 = 0,9987$ ) para concentrações de C944 entre os 6 e os 200 mg.L<sup>-1</sup> (Figura 4.34) ( $r^2$  - coeficiente de correlação linear).

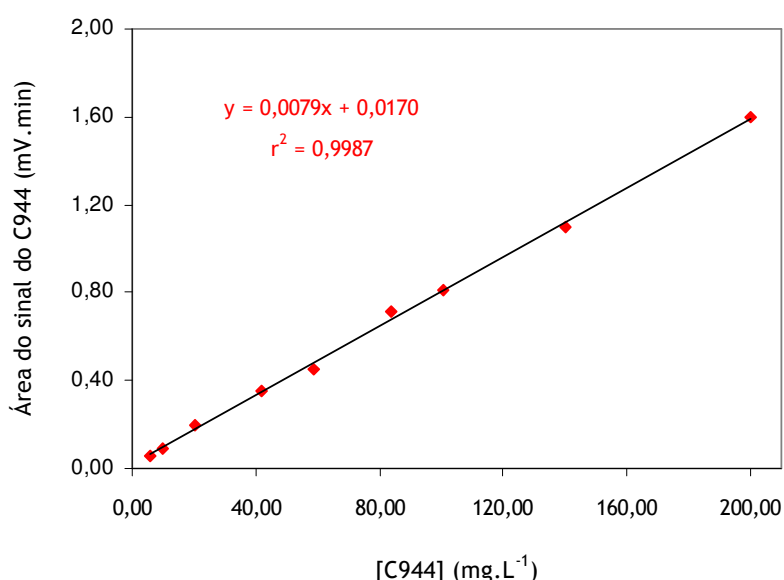


Figura 4.34 - Curva de calibração do C944 em clorofórmio (método A).

A concentração de C944 existente nos geotêxteis B2-500 e B4-500 pode ser quantificada substituindo os valores das áreas dos respectivos sinais cromatográficos (valores no Quadro 4.16) na equação da curva de calibração (Quadro 4.17). As concentrações de C944 encontradas para os geotêxteis B2-500 e B4-500 (amostras intactas) pelo método da curva de calibração ( $0,170 \pm 0,012\%$  e  $0,383 \pm 0,014\%$ , respectivamente) não foram muito discrepantes dos valores indicados pelo fabricante.

Quadro 4.17 - Determinação do C944 pelo método da curva de calibração (método A).

| Equação da curva ( $y = ax + b$ ) |        |                | [C944] <sub>B2-500</sub> <sup>*</sup> | [C944] <sub>B4-500</sub> <sup>*</sup> |
|-----------------------------------|--------|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| a                                 | b      | r <sup>2</sup> | (%)                                   | (%)                                   |
| 0,0079                            | 0,0170 | 0,9987         | 0,170 ± 0,012                         | 0,383 ± 0,014                         |

$$[C944]_{\text{GEOTÊXTIL}} (\%) = [( \text{Valor interpolado}^{**} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times V_{\text{CLOROFÓRMIO}} (\text{L})) / m_{\text{GEOTÊXTIL}} (\text{mg})] \times 100$$

<sup>\*</sup>Limites de confiança, para um grau de confiança de 95%, calculados de acordo com Miller e Miller [150] e usando a equação de propagação de erros de acordo com Skoog *et al.* [146].

<sup>\*\*</sup>Obtido por substituição da área do sinal cromatográfico na equação da curva de regressão linear.

No método B, a curva de calibração foi construída através da análise de várias amostras do geotêxtil B4-500 com diferentes massas (de 0,10 a 1,00 g) e admitindo a concentração de C944 indicada pelo fabricante como verdadeira (diferentes massas de geotêxtil possuem diferentes massas de C944). Os cromatogramas obtidos na análise das amostras do geotêxtil B4-500 (com diferentes massas totais) encontram-se ilustrados na Figura 4.35.

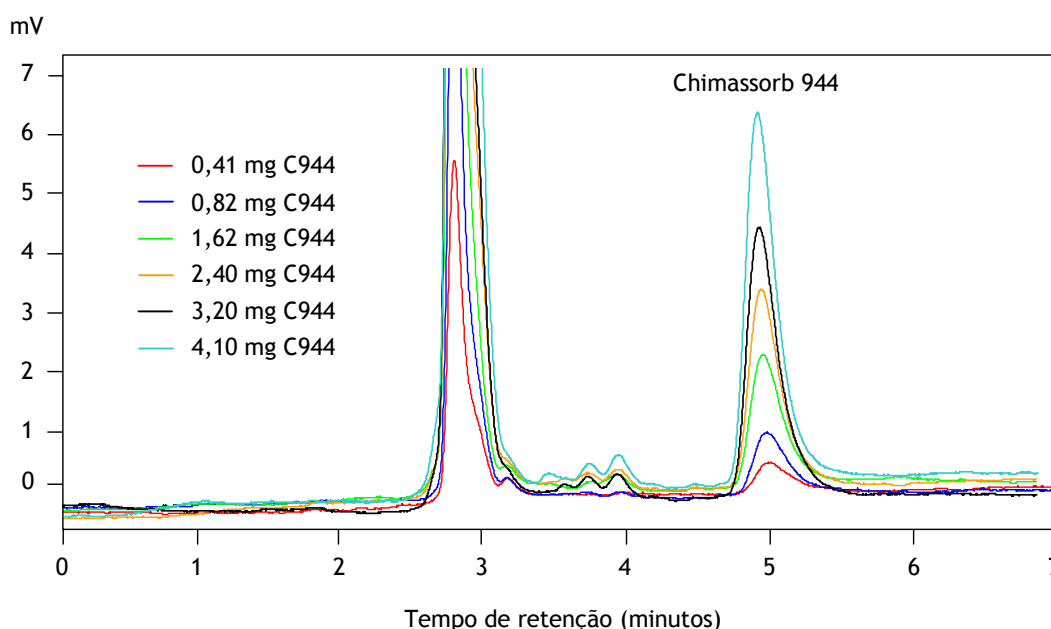


Figura 4.35 - Cromatogramas obtidos para as amostras do geotêxtil B4-500 com diferentes massas.

A relação obtida entre a massa de C944 (existente na amostra) e a área do sinal cromatográfico do C944 é linear ( $r^2 = 0,9972$ ) para massas de C944 entre os 0,4 e os 4 mg (Figura 4.36); a linearidade da curva de calibração mostrou que o rendimento do processo de extração não dependeu da massa do geotêxtil B4-500. A análise de amostras do geotêxtil B2-500 com diferentes massas totais permite também obter uma relação linear entre a área do sinal cromatográfico do C944 e a quantidade de aditivo existente na amostra (curva de calibração não apresentada).

As concentrações de C944 determinadas para os geotêxteis B2-500 e B4-500 (amostras intactas) pelo método B ( $0,192 \pm 0,025\%$  e  $0,421 \pm 0,030\%$ , respectivamente) foram idênticas aos valores indicados pelo fabricante (Quadro 4.18).

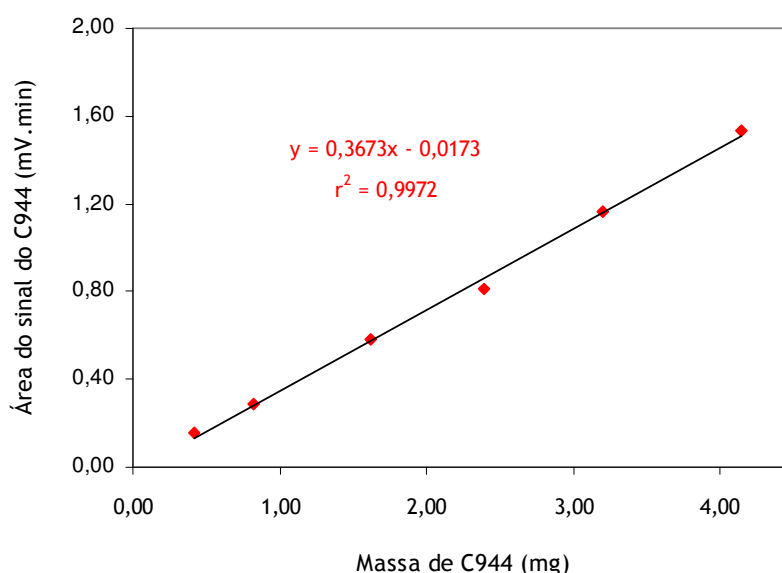


Figura 4.36 - Curva de calibração usando diferentes massas de geotêxtil B4-500 (método B).

Quadro 4.18 - Determinação do C944 nos geotêxteis B2-500 e B4-500 pelo método B.

| Equação da curva ( $y = ax + b$ ) |          |        | [C944] B2-500 *   | [C944] B4-500 *   |
|-----------------------------------|----------|--------|-------------------|-------------------|
| a                                 | b        | $r^2$  | (%)               | (%)               |
| 0,3673                            | - 0,0173 | 0,9972 | $0,192 \pm 0,025$ | $0,421 \pm 0,030$ |

$$[\text{C944}]_{\text{GEOTÊXTIL}} (\%) = [\text{Valor interpolado}^{**} (\text{mg}) / m_{\text{GEOTÊXTIL}} (\text{mg})] \times 100$$

\*Limites de confiança, para um grau de confiança de 95%, calculados de acordo com Miller e Miller [150] e usando a equação de propagação de erros de acordo com Skoog *et al.* [146].

\*\*Obtido por substituição da área do sinal cromatográfico na equação da curva de regressão linear.

As concentrações de C944 obtidas pelos dois métodos de quantificação foram muito próximas entre si e idênticas ao valor especificado pelo fabricante. No entanto, o método B permite ter em conta o rendimento do processo de extração e compensar possíveis perdas de C944 durante a extração (a interpolação na curva de calibração obtida através do método A não tem em conta o rendimento do processo de extração). Deste modo, a quantificação através do método B permite determinar com maior confiança a concentração de C944 nos geotêxteis. Assim, a quantidade de C944 existente nos geotêxteis após a exposição aos agentes climáticos simulados em laboratório (Capítulo 9) e após a exposição aos agentes climáticos reais (Capítulo 10) será determinada através do método B.

#### 4.13 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se à descrição dos métodos usados para avaliar o efeito dos vários agentes de degradação na durabilidade dos geotêxteis; foram descritos os procedimentos de ensaio usados, as características dos equipamentos utilizados, os parâmetros determinados e, quando aplicável, foram apresentados os resultados de um ensaio tipo.

Os métodos descritos neste capítulo serão usados para caracterizar os geotêxteis, antes (Capítulo 5) e após a exposição aos diversos agentes de degradação (Capítulos 6-11).





# **CAPÍTULO 5**

## **Principais características dos geotêxteis estudados.**

### **Amostragem e preparação de provetes**

#### **5.1 - Introdução**

Neste trabalho, procede-se ao estudo da resistência dos geotêxteis a vários agentes de degradação: soluções químicas (Capítulo 6), termo-oxidação (Capítulos 7 e 8), agentes climatéricos simulados em laboratório (Capítulo 9), agentes climatéricos reais (Capítulo 10) e agentes do solo (Capítulo 11). A resistência dos geotêxteis aos vários agentes de degradação é fundamentalmente determinada pela composição química dos materiais. Assim, é muito importante conhecer integralmente a composição química dos geotêxteis expostos aos diversos agentes de degradação; a exposição de geotêxteis com diferentes estabilizações permite avaliar qual o contributo dos aditivos químicos, se algum, para o aumento da durabilidade dos materiais.

Neste capítulo, apresentam-se as principais características dos geotêxteis estudados neste trabalho: primeiro, descreve-se a estrutura e composição química dos geotêxteis e, em seguida, procede-se à caracterização de algumas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das amostras de referência dos materiais (amostras não degradadas). No final do capítulo, procede-se à descrição dos princípios gerais usados na amostragem e na preparação de provetes dos geotêxteis para os vários ensaios de caracterização e de durabilidade.

A caracterização física dos geotêxteis foi realizada com base na determinação da massa por unidade de área e da espessura dos materiais. Os geotêxteis foram caracterizados mecanicamente através de ensaios de tracção-extensão, rasgamento e punçoamento estático. A caracterização hidráulica dos materiais foi efectuada através da determinação da permeabilidade à água normal ao plano. Os geotêxteis foram também analisados por microscopia electrónica de varrimento e por microanálise por raio X.

#### **5.2 - Características dos geotêxteis estudados: estrutura e composição**

Neste trabalho, foram estudados 8 geotêxteis não-tecidos agulhados produzidos por uma empresa nacional (Carvalhos LDA, Lousã). Os geotêxteis foram especialmente fabricados a partir de fibras de PP com diferentes composições químicas. Apesar dos geotêxteis terem sido fabricados para fins de investigação, o seu processo de fabrico foi totalmente idêntico ao processo de fabrico de materiais para fins comerciais.

Foram fabricados 4 tipos de fibras de PP, estabilizadas com diferentes quantidades do aditivo C944 (0%, 0,2% ou 0,4%) e do pigmento negro de carbono (0% ou 1,08%) (as principais características do C944 e do negro de carbono encontram-se resumidas no ponto 3.4). As fibras possuíam uma massa linear de 8 denier e foram cortadas com aproximadamente 75 mm de comprimento. As principais características das diferentes fibras fabricadas encontram-se resumidas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Principais características das fibras de PP fabricadas.

| Fibras | Cor    | C944<br>(% em massa) | Negro de carbono<br>(% em massa) | PP<br>(% em massa) |
|--------|--------|----------------------|----------------------------------|--------------------|
| B0     | Branca | 0                    | 0                                | 100                |
| B2     | Branca | 0,2                  | 0                                | 99,8               |
| B4     | Branca | 0,4                  | 0                                | 99,6               |
| P2     | Preta  | 0,2                  | 1,08                             | 98,72              |

Os diferentes tipos de fibras produzidos foram utilizados para o fabrico de 8 geotêxteis não-tecidos agulhados (4 geotêxteis com uma massa por unidade de área de 280 g.m<sup>-2</sup> e outros 4 com uma massa por unidade de área de 500 g.m<sup>-2</sup>). As principais características dos geotêxteis fabricados podem ser encontradas no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Principais características dos geotêxteis fabricados.

| Geotêxtil | MUA*<br>(g.m <sup>-2</sup> ) | Fibras | Cor    | C944<br>(% em massa) | Negro carbono<br>(% em massa) |
|-----------|------------------------------|--------|--------|----------------------|-------------------------------|
| B0-280    | 280                          | B0     | Branca | 0                    | 0                             |
| B2-280    | 280                          | B2     | Branca | 0,2                  | 0                             |
| B4-280    | 280                          | B4     | Branca | 0,4                  | 0                             |
| B0-500    | 500                          | B0     | Branca | 0                    | 0                             |
| B2-500    | 500                          | B2     | Branca | 0,2                  | 0                             |
| B4-500    | 500                          | B4     | Branca | 0,4                  | 0                             |
| P2-280    | 280                          | P2     | Preta  | 0,2                  | 1,08                          |
| P2-500    | 500                          | P2     | Preta  | 0,2                  | 1,08                          |

(\*valor da massa por unidade de área definida pelo produtor)

Foram atribuídas designações aos geotêxteis produzidos de modo a permitir uma identificação fácil e inequívoca dos diferentes materiais. Por exemplo, o geotêxtil com 0,2% de C944, sem negro de carbono e com uma massa por unidade de área de 500 g.m<sup>-2</sup> foi designado por B2-500 (*B* significa que o material é branco, *2* significa que tem 0,2% de C944 e *500* é o valor da massa por unidade de área definida pelo fabricante).

Os geotêxteis foram fabricados em grandes quantidades e fornecidos em rolos (embrulhados em plástico negro para proteger os materiais da acção da luz solar); os geotêxteis possuíam 2,30 metros de largura e um comprimento entre os 48 e os 67 metros.

### 5.3 - Caracterização dos geotêxteis estudados

#### 5.3.1 - Determinação da massa por unidade de área

A massa por unidade de área dos geotêxteis foi determinada de acordo com a norma NP EN ISO 9864 (a descrição do método para a determinação da massa por unidade de área dos geotêxteis pode ser encontrada no ponto 4.3).

O Quadro 5.3 resume os valores médios das massas por unidade de área dos 8 geotêxteis, bem como os correspondentes coeficientes de variação. Os resultados apresentados foram obtidos a partir da determinação da massa por unidade de área de 10 provetes intactos de cada um dos geotêxteis; são também apresentados os valores mínimos e máximos obtidos para cada conjunto de provetes.

Quadro 5.3 - Massa por unidade de área das amostras intactas dos geotêxteis.

| Geotêxtil | Massa por unidade de área ( $\text{g.m}^{-2}$ ) | Massa por unidade de área mínima ( $\text{g.m}^{-2}$ ) | Massa por unidade de área máxima ( $\text{g.m}^{-2}$ ) |
|-----------|---|--|--|
| B0-280    | 283 (11%)                                       | 244  | 351  |
| B2-280    | 272 (7,8%)                                      | 251  | 313  |
| B4-280    | 263 (7,6%)                                      | 236  | 297  |
| B0-500    | 501 (13%)                                       | 431  | 587  |
| B2-500    | 502 (7,0%)                                      | 443  | 572  |
| B4-500    | 510 (7,7%)                                      | 422  | 569  |
| P2-280    | 284 (12%)                                       | 253  | 348  |
| P2-500    | 499 (7,7%)                                      | 442  | 578  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A massa por unidade de área dos geotêxteis era conhecida à partida, pois foi um parâmetro definido durante o fabrico dos materiais. Os valores determinados para as massas por unidade de área dos geotêxteis foram muito semelhantes aos valores definidos pelo fabricante. O maior afastamento foi observado para o geotêxtil B4-280, que possuía uma massa por unidade de área de  $263 \text{ g.m}^{-2}$  (cerca de 6% inferior ao valor definido pelo fabricante).

Os coeficientes de variação obtidos foram relativamente elevados (entre os 7,0% e os 13%), o que mostrou a existência de uma elevada dispersão de resultados associada à massa por unidade de área dos geotêxteis. Esta dispersão resulta da heterogeneidade característica dos materiais e pode ser explicada pela aleatoriedade existente no seu processo de fabrico.

#### 5.3.2 - Determinação da espessura

A espessura dos geotêxteis foi determinada de acordo com os procedimentos da norma NP EN ISO 9863-1 (este método de ensaio encontra-se descrito no ponto 4.4).

O Quadro 5.4 resume os valores das espessuras médias dos geotêxteis, bem como os respectivos coeficientes de variação. Os resultados apresentados foram obtidos a partir da determinação da espessura de 20 provetes intactos de cada um dos geotêxteis; são também apresentados os valores da espessura mínima e da espessura máxima obtidos para cada conjunto de provetes.

Quadro 5.4 - Espessura das amostras intactas dos geotêxteis.

| Geotêxtil | Espessura (mm) | Espessura mínima (mm) | Espessura máxima (mm) |
|-----------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| B0-280    | 3,21 (4,7%)    | 2,92                  | 3,47                  |
| B2-280    | 3,16 (4,8%)    | 2,81                  | 3,43                  |
| B4-280    | 3,17 (4,5%)    | 2,91                  | 3,42                  |
| B0-500    | 3,81 (4,5%)    | 3,41                  | 4,08                  |
| B2-500    | 3,81 (2,8%)    | 3,61                  | 4,05                  |
| B4-500    | 3,97 (2,5%)    | 3,68                  | 4,12                  |
| P2-280    | 3,03 (4,5%)    | 2,78                  | 3,25                  |
| P2-500    | 3,68 (3,6%)    | 3,52                  | 4,03                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  apresentavam espessuras superiores aos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ . As espessuras dos geotêxteis pretos eram ligeiramente inferiores às espessuras dos geotêxteis brancos equivalentes. Os coeficientes de variação associados à espessura dos materiais foram relativamente pequenos (coeficiente de variação máximo de 4,8%) quando comparados com os valores obtidos na determinação da massa por unidade de área.

### 5.3.3 - Ensaio de tracção-extensão: NP EN ISO 10319

#### 5.3.3.1 - Considerações iniciais

Os parâmetros mecânicos apresentados neste ponto foram determinados de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (a descrição detalhada deste método de ensaio pode ser encontrada no ponto 4.5).

Os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319 foram, neste trabalho, um dos ensaios mais utilizados para avaliar a degradação sofrida pelos geotêxteis expostos aos diversos agentes de degradação (comparando os valores obtidos para os provetes intactos com os valores obtidos para os provetes de referência).

Em seguida, apresentam-se os parâmetros mecânicos determinados de acordo com a norma NP EN ISO 10319 para os 8 geotêxteis usados neste trabalho. São apresentados os resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico (dos geotêxteis), bem como para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico.

### 5.3.3.2 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico

O Quadro 5.5 resume os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima dos geotêxteis, bem como os respectivos coeficientes de variação. O Quadro 5.6 resume os valores da rigidez secante (determinada às extensões de 2%, 5%, 10% e 20%) e da robustez dos geotêxteis. Os resultados apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 20 provetes intactos de cada um dos geotêxteis (provetes ensaiados na direcção de fabrico).

Quadro 5.5 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência à tracção<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força<br>máxima (%) |
|-----------|--|---------------------------------|
| B0-280    | 13,8 (11%)                                     | 113 (6,8%)                      |
| B2-280    | 13,1 (11%)                                     | 112 (8,1%)                      |
| B4-280    | 14,0 (6,2%)                                    | 113 (7,8%)                      |
| B0-500    | 25,6 (11%)                                     | 136 (12%)                       |
| B2-500    | 25,8 (11%)                                     | 135 (8,0%)                      |
| B4-500    | 26,4 (5,6%)                                    | 140 (5,7%)                      |
| P2-280    | 14,3 (8,2%)                                    | 80,3 (7,3%)                     |
| P2-500    | 25,6 (7,1%)                                    | 117 (6,1%)                      |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 5.6 - Rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e robustez das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Geotêxtil | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--|--|---|---|-----------------------------------|
| B0-280    | 7,3  | 9,9  | 11,0  | 12,7  | 1053                              |
| B2-280    | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               |
| B4-280    | 15,7   | 15,4   | 15,1  | 16,1  | 1135                              |
| B0-500    | 13,8   | 26,2   | 33,6  | 36,4  | 2382                              |
| B2-500    | 15,8   | 29,4   | 36,8  | 38,9  | 2450                              |
| B4-500    | 17,3   | 30,6   | 36,7  | 38,3  | 2595                              |
| P2-280    | 24,9   | 23,8   | 23,0  | 23,9  | 786                               |
| P2-500    | 16,7   | 29,8   | 37,1  | 39,4  | 1979                              |

Os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> possuíam resistências à tracção semelhantes entre si (entre os 13,1 e os 14,3 kN.m<sup>-1</sup>), assim como os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (entre 25,6 e 26,4 kN.m<sup>-1</sup>). Os coeficientes de variação obtidos para a resistência à tracção foram relativamente elevados, situando-se entre 5,6% e 11%. A obtenção de coeficientes de variação tão elevados era previsível, uma vez que a elevada dispersão associada à massa por unidade de área já havia anteriormente indicado a existência de alguma heterogeneidade nos materiais.

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam extensões na força máxima idênticas (entre 112% e 113%). Os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 também possuíam extensões na força máxima muito próximas entre si (entre 135% e 140%), mas superiores às extensões apresentadas pelos geotêxteis com menor massa por unidade de área. As extensões na força máxima dos geotêxteis pretos (P2-280 e P2-500) foram menores que as extensões apresentadas pelos geotêxteis brancos com massas por unidade de área semelhantes. A dispersão de resultados associada à extensão na força máxima foi também relativamente alta (entre os 5,7% e os 12%).

De um modo geral, os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  possuíam uma rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20% de extensão) superior à rigidez secante dos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  (para uma dada extensão, a força desenvolvida pelos geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  era superior à força desenvolvida pelos materiais com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ ). Os valores de rigidez secante apresentados pelo geotêxtil P2-280 foram superiores aos valores apresentados pelos geotêxteis brancos equivalentes. Ao contrário do geotêxtil P2-280, o geotêxtil P2-500 apresentou valores de rigidez secante muito semelhantes aos valores apresentados pelos geotêxteis brancos com uma massa por unidade de área semelhante.

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam uma robustez semelhante (valores entre os 976 e os 1135  $\text{kN.m}^{-1}$ ). Os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 possuíam valores de robustez superiores (entre os 2382 e os 2595  $\text{kN.m}^{-1}$ ) aos valores apresentados pelos geotêxteis de menor massa por unidade de área. Os geotêxteis pretos apresentavam valores de robustez inferiores aos valores dos geotêxteis brancos equivalentes (786 e 1979  $\text{kN.m}^{-1}$  para os geotêxteis P2-280 e P2-500, respectivamente). Os geotêxteis brancos são mais deformáveis que os geotêxteis pretos (atingem forças semelhantes, mas a extensões superiores), o que os torna mais robustos que os geotêxteis pretos equivalentes (a área abaixo da curva força-extensão é superior para os geotêxteis brancos).

A Figura 5.1 compara as curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280. As curvas médias força-extensão dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 encontram-se ilustradas na Figura 5.2.

As curvas médias força-extensão traduzem graficamente o comportamento dos geotêxteis durante os ensaios de tracção-extensão. Através da análise das curvas médias força-extensão dos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , é possível concluir de imediato que os materiais apresentam valores de resistência à tracção muito semelhantes. No entanto, para a mesma extensão a força desenvolvida pelo geotêxtil P2-280 é sempre superior à força desenvolvida pelos restantes geotêxteis. Assim, a rigidez secante do geotêxtil P2-280 será sempre superior à rigidez secante dos restantes geotêxteis (para todas as extensões a que este parâmetro for determinado). A comparação da curva média força-extensão do geotêxtil P2-280 com as curvas médias dos restantes geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  mostra claramente que a robustez deste geotêxtil é menor que a robustez dos geotêxteis brancos equivalentes.

As curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  permitem efectuar uma comparação semelhante à comparação efectuada para os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  (no entanto, as conclusões obtidas não seriam exactamente iguais às obtidas para os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ ).

As curvas médias força-extensão fornecem de imediato um conjunto de informações relevantes acerca dos parâmetros mecânicos dos materiais. Assim, estas curvas são muito úteis para comparar diferentes materiais e/ou para comparar o efeito (se algum) dos diversos agentes de degradação nas propriedades dos materiais.

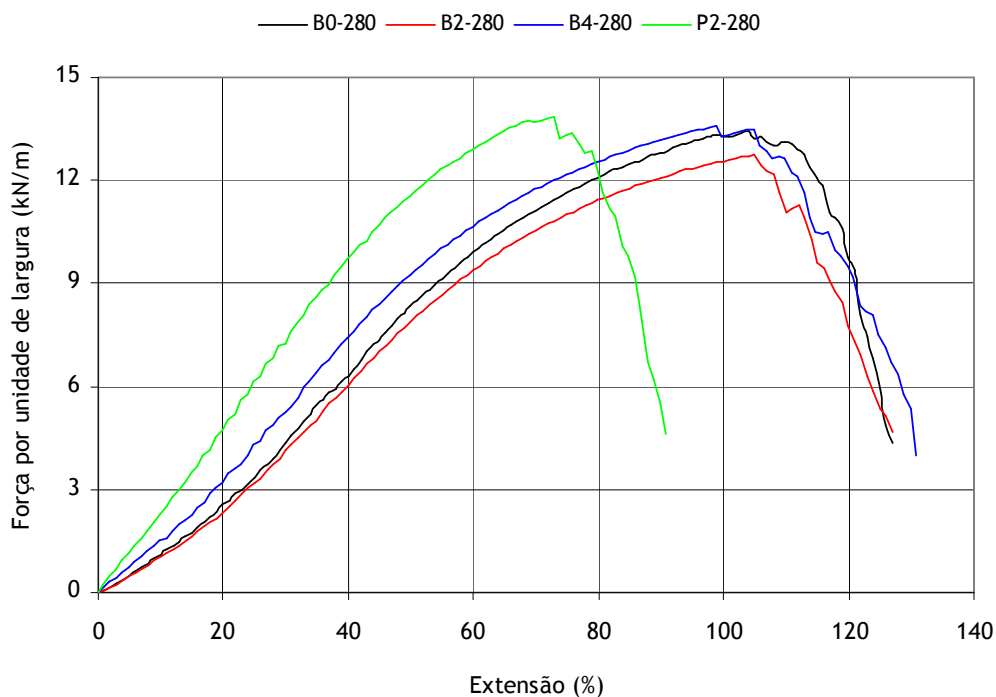


Figura 5.1 - Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> (provete ensaiado na direcção de fabrico) (NP EN ISO 10319).

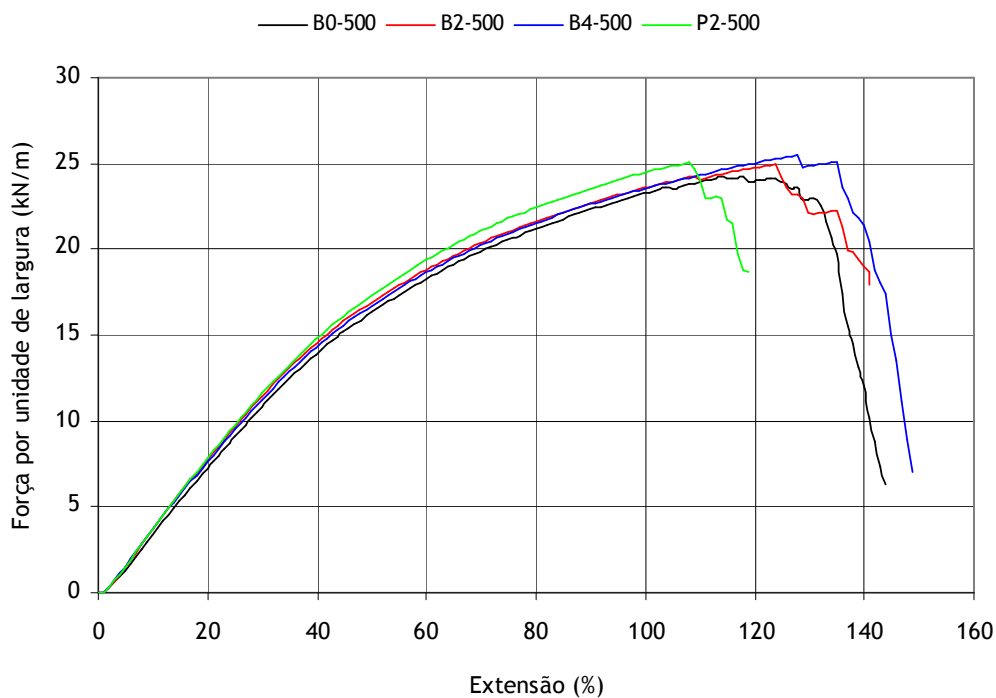


Figura 5.2 - Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (provete ensaiado na direcção de fabrico) (NP EN ISO 10319).

**5.3.3.3 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico**

A resistência à tracção e a extensão na força máxima dos geotêxteis foram também determinadas na direcção perpendicular à de fabrico dos materiais. A determinação destes parâmetros teve como objectivo único a caracterização dos materiais (os ensaios de durabilidade foram sempre realizados com provetes cortados apenas na direcção de fabrico).

O Quadro 5.7 resume os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima dos geotêxteis, bem como os respectivos coeficientes de variação. Os resultados apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 5 provetes intactos de cada um dos geotêxteis (provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico).

Quadro 5.7 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN ISO 10319) (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência à tracção<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força<br>máxima (%) |
|-----------|--|---------------------------------|
| B0-280    | 6,72 (11%)                                     | 190 (6,6%)                      |
| B2-280    | 6,13 (7,5%)                                    | 173 (5,6%)                      |
| B4-280    | 6,73 (10%)                                     | 173 (11%)                       |
| B0-500    | 12,1 (11%)                                     | 163 (13%)                       |
| B2-500    | 12,6 (7,6%)                                    | 168 (5,0%)                      |
| B4-500    | 13,6 (8,9%)                                    | 181 (7,4%)                      |
| P2-280    | 6,05 (11%)                                     | 172 (2,8%)                      |
| P2-500    | 11,8 (5,7%)                                    | 147 (6,0%)                      |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis possuíam resistências à tracção muito semelhantes: os de 280 g.m<sup>-2</sup> entre os 6,05 e os 6,73 kN.m<sup>-1</sup> e os de 500 g.m<sup>-2</sup> entre os 11,8 e os 13,6 kN.m<sup>-1</sup>. Os geotêxteis possuíam uma resistência à tracção na direcção perpendicular à de fabrico muito inferior à resistência à tracção na direcção de fabrico. Os coeficientes de variação relativamente elevados (entre os 5,7% e os 11%) podem ser explicados pela heterogeneidade característica dos materiais.

As extensões na força máxima na direcção perpendicular à de fabrico foram superiores às extensões na força máxima determinadas na direcção de fabrico. Assim, os geotêxteis mostraram ser mais deformáveis na direcção perpendicular à de fabrico do que na direcção de fabrico.

A Figura 5.3 compara as curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis B0-280 e B0-500 na direcção de fabrico e na direcção perpendicular à de fabrico. A partir das curvas médias, é possível concluir que os geotêxteis na direcção perpendicular à de fabrico são menos rígidos, apresentam uma menor resistência à tracção e possuem uma maior extensão na força máxima.



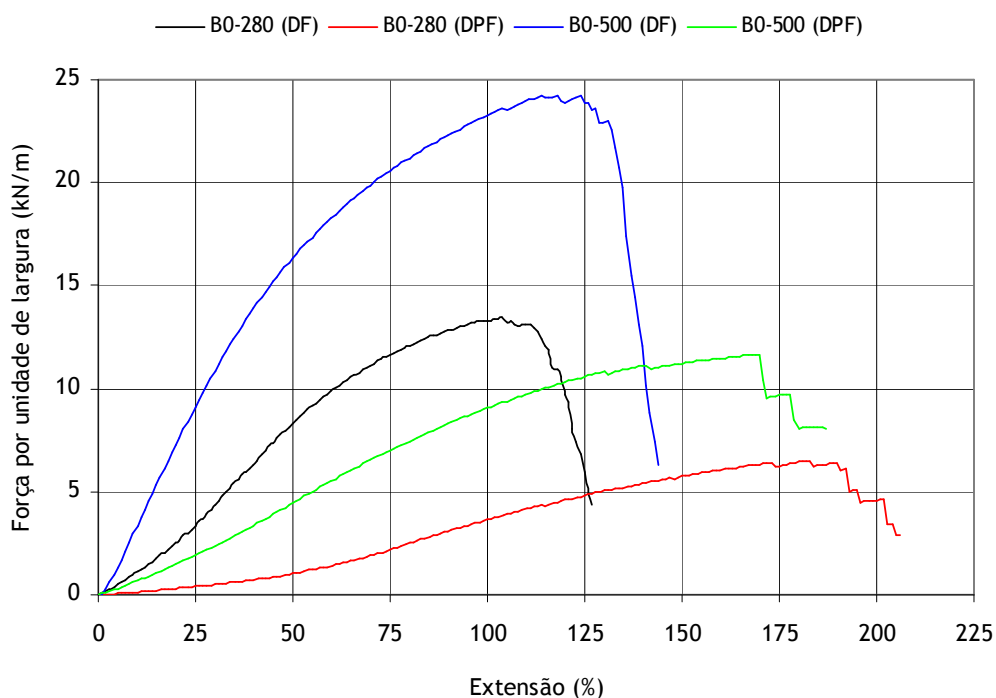


Figura 5.3 - Curvas médias força-estiramento obtidas para os geotêxteis B0-280 e B0-500 na direcção de fabrico e na direcção perpendicular à de fabrico (NP EN ISO 10319).

#### 5.3.4 - Ensaio de tracção-estiramento: NP EN 29073-3

##### 5.3.4.1 - Considerações iniciais

Os parâmetros mecânicos apresentados neste ponto foram determinados de acordo com a norma NP EN 29073-3 (a descrição detalhada desta metodologia pode ser encontrada no ponto 4.6).

Os ensaios de tracção-estiramento segundo a norma NP EN 29073-3 foram, juntamente com os ensaios de tracção-estiramento de acordo com a norma NP EN ISO 10319, um dos ensaios mais utilizados para avaliar a degradação sofrida pelos geotêxteis expostos aos agentes de degradação.

Em seguida, apresentam-se os parâmetros mecânicos determinados de acordo com a norma NP EN 29073-3 para os 8 geotêxteis estudados neste trabalho. São apresentados os resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico, bem como os resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico.

##### 5.3.4.2 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção de fabrico

O Quadro 5.8 resume os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima dos geotêxteis, bem como os correspondentes coeficientes de variação. Os valores da rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e da robustez dos geotêxteis encontram-se resumidos no Quadro 5.9. Os valores apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 20 provetes intactos de cada um dos geotêxteis (provetes ensaiados na direcção de fabrico).

Quadro 5.8 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência à tracção<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força<br>máxima (%) |
|-----------|--|---------------------------------|
| B0-280    | 13,4 (14%)                                     | 76,1 (8,4%)                     |
| B2-280    | 13,5 (12%)                                     | 78,4 (6,6%)                     |
| B4-280    | 13,3 (12%)                                     | 75,8 (8,0%)                     |
| B0-500    | 26,2 (14%)                                     | 75,0 (10%)                      |
| B2-500    | 26,6 (11%)                                     | 71,6 (9,7%)                     |
| B4-500    | 27,6 (6,1%)                                    | 74,1 (10%)                      |
| P2-280    | 15,3 (10%)                                     | 54,6 (8,3%)                     |
| P2-500    | 25,6 (12%)                                     | 63,0 (9,0%)                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 5.9 - Rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) e robustez das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Geotêxtil | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--|--|---|---|-----------------------------------|
| B0-280    | 5,8  | 6,6  | 6,7   | 7,6   | 438                               |
| B2-280    | 5,9  | 6,7  | 7,0   | 8,1   | 478                               |
| B4-280    | 6,0  | 7,2  | 7,3   | 8,7   | 453                               |
| B0-500    | 27,0   | 30,2   | 31,3  | 35,3  | 1117                              |
| B2-500    | 32,5   | 35,1   | 35,9  | 40,0  | 1076                              |
| B4-500    | 33,3   | 36,1   | 36,9  | 40,3  | 1188                              |
| P2-280    | 11,8   | 14,0   | 14,1  | 18,5  | 381                               |
| P2-500    | 31,0   | 33,8   | 35,1  | 39,7  | 848                               |

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam resistências à tracção semelhantes (entre os 13,3 e os 13,5 kN.m<sup>-1</sup>), mas menores que a resistência à tracção apresentada pelo geotêxtil P2-280 (15,3 kN.m<sup>-1</sup>). Relativamente aos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup>, as suas resistências à tracção variaram entre os 25,6 kN.m<sup>-1</sup> (geotêxtil P2-500) e os 27,6 kN.m<sup>-1</sup> (geotêxtil B4-500). Os coeficientes de variação obtidos para a resistência à tracção foram relativamente elevados: à excepção do geotêxtil B4-500, todos os outros geotêxteis possuíam coeficientes de variação iguais ou superiores a 10%. A obtenção de coeficientes de variação tão altos pode ser explicada, mais uma vez, pela existência de alguma heterogeneidade nos materiais.

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam extensões na força máxima entre os 75,8% e 78,4%, ao passo que os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 possuíam extensões na força máxima entre os 71,6% e os 75,0%. As extensões na força máxima dos geotêxteis pretos foram inferiores às extensões apresentadas pelos geotêxteis brancos com massas por unidade de área semelhantes (54,6% para o

geotêxtil P2-280 e 63,0% para o geotêxtil P2-500). Os coeficientes de variação associados à extensão na força máxima variaram entre os 6,6% e os 10%).

Os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  possuíam, para as extensões de 2%, 5%, 10% e 20%, uma rigidez secante superior à rigidez secante dos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ . Os valores de rigidez secante do geotêxtil P2-280 foram superiores aos valores apresentados pelos geotêxteis brancos com a mesma massa por unidade de área. Ao contrário do geotêxtil P2-280, o geotêxtil P2-500 possuía valores de rigidez secante similares aos valores apresentados pelos geotêxteis brancos equivalentes.

Os valores de robustez dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 eram semelhantes entre si (entre os 438 e os  $478 \text{ kN.m}^{-1}$ ), mas inferiores aos valores apresentados pelos geotêxteis brancos de maior massa por unidade de área (entre os 1076 e os  $1188 \text{ kN.m}^{-1}$ ); os valores de robustez dos geotêxteis pretos eram inferiores aos valores dos geotêxteis brancos equivalentes ( $381 \text{ kN.m}^{-1}$  para o geotêxtil P2-280 e  $848 \text{ kN.m}^{-1}$  para o geotêxtil P2-500).

As curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  encontram-se ilustradas na Figura 5.4. Do mesmo modo, a Figura 5.5 ilustra as curvas médias obtidas para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$ .

As curvas médias força-extensão dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 são muito semelhantes, o que permite concluir que estes materiais apresentam propriedades mecânicas muito idênticas entre si. A curva média do geotêxtil P2-280 é diferente das curvas médias dos restantes geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , mostrando que este material possui maior resistência à tracção, maior rigidez secante (para qualquer extensão especificada), menor extensão na força máxima e menor robustez que os restantes geotêxteis com uma massa por unidade de área semelhante.

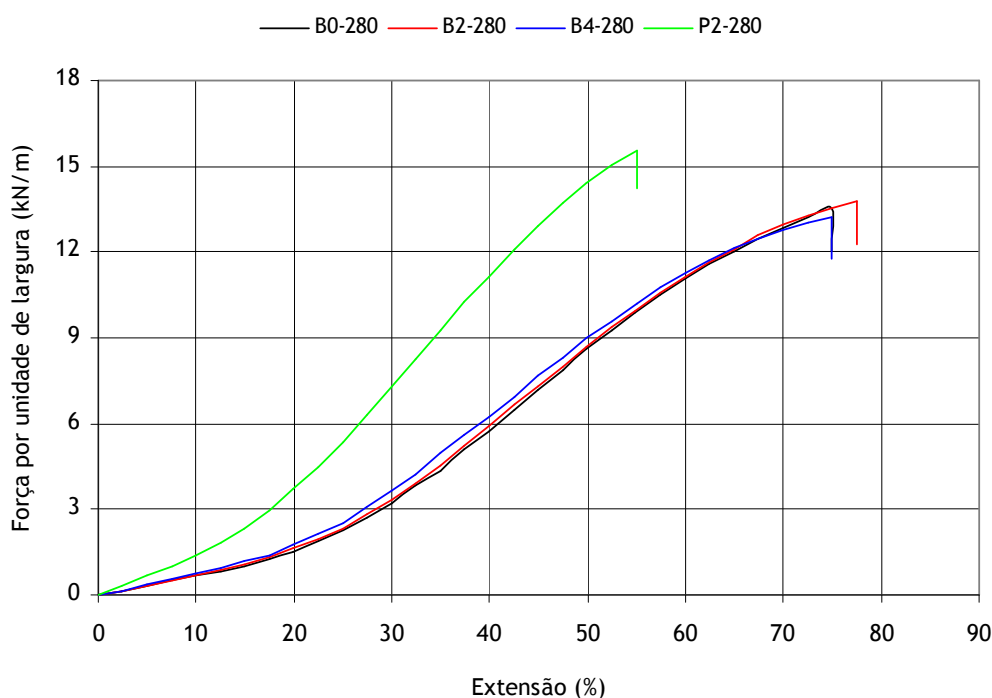


Figura 5.4 - Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  (provete ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN 29073-3).

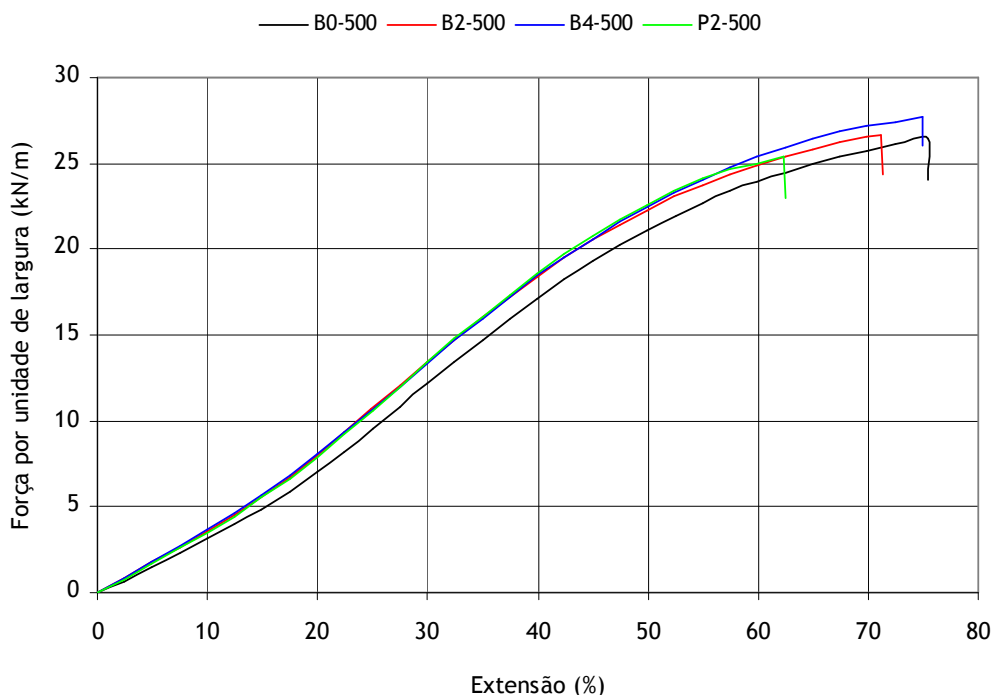


Figura 5.5 - Curvas médias força-extensão obtidas para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN 29073-3).

As curvas médias força-extensão dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 são semelhantes entre si, mostrando que estes geotêxteis possuem propriedades mecânicas muito idênticas. Ao contrário dos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , a curva média do geotêxtil preto com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  possui várias semelhanças com as curvas médias dos restantes geotêxteis brancos com  $500 \text{ g.m}^{-2}$ .

#### 5.3.4.3 - Resultados obtidos para provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico

A resistência à tracção e a extensão na força máxima dos geotêxteis foram também determinadas na direcção perpendicular à de fabrico dos materiais. Estes parâmetros foram determinados apenas com o objectivo de caracterizar os geotêxteis estudados neste trabalho (os ensaios de durabilidade foram sempre realizados apenas com provetes cortados na direcção do fabrico dos materiais).

O Quadro 5.10 resume os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima dos geotêxteis, bem como os correspondentes coeficientes de variação. Os valores apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 5 provetes intactos de cada um dos geotêxteis (provetes ensaiados na direcção perpendicular à de fabrico).

Os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  possuíam resistências à tracção idênticas entre si, mas inferiores às dos geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  (no caso dos geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , resistências à tracção entre 5,12 e 5,53  $\text{kN.m}^{-1}$ ; no caso dos geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$ , resistências à tracção entre 13,0 e 13,7  $\text{kN.m}^{-1}$ ).

As resistências à tracção dos geotêxteis na direcção perpendicular à de fabrico foram inferiores às resistências à tracção na direcção de fabrico. Por sua vez, as extensões na força máxima obtidas na direcção perpendicular à de fabrico foram superiores às extensões na força máxima determinadas na direcção de fabrico.

Quadro 5.10 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis (NP EN 29073-3) (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência à tracção<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força<br>máxima (%) |
|-----------|--|---------------------------------|
| B0-280    | 5,12 (6,1%)                                    | 114 (5,9%)                      |
| B2-280    | 5,49 (16%)                                     | 125 (7,1%)                      |
| B4-280    | 5,15 (10%)                                     | 128 (9,6%)                      |
| B0-500    | 13,7 (12%)                                     | 121 (5,2%)                      |
| B2-500    | 13,4 (6,2%)                                    | 123 (4,1%)                      |
| B4-500    | 13,6 (5,7%)                                    | 116 (8,5%)                      |
| P2-280    | 5,53 (15%)                                     | 122 (6,7%)                      |
| P2-500    | 13,0 (9,4%)                                    | 107 (5,9%)                      |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

### 5.3.5 - Ensaios de rasgamento

A resistência ao rasgamento dos geotêxteis foi determinada de acordo com a norma ASTM D4533 (a descrição detalhada desta metodologia poder ser encontrada no ponto 4.7).

O Quadro 5.11 resume os valores médios da resistência ao rasgamento dos geotêxteis (na direcção de fabrico), bem como os respectivos coeficientes de variação. Os resultados apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 20 provetes intactos de cada um dos geotêxteis.

Quadro 5.11 - Resistência ao rasgamento das amostras intactas dos geotêxteis (valores determinados na direcção de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência ao rasgamento<br>(N) |
|-----------|----------------------------------|
| B0-280    | 395 (16%)                        |
| B2-280    | 391 (16%)                        |
| B4-280    | 409 (17%)                        |
| B0-500    | 615 (15%)                        |
| B2-500    | 630 (16%)                        |
| B4-500    | 637 (12%)                        |
| P2-280    | 433 (15%)                        |
| P2-500    | 572 (15%)                        |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> possuíam resistências ao rasgamento semelhantes (valores entre os 391 e os 433 N). As resistências ao rasgamento dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> eram também semelhantes entre si (valores entre os 572 e os 637 N). Os coeficientes de variação obtidos para a resistência ao rasgamento foram relativamente elevados (entre os 12% e os 17%) o que mostrou, mais uma vez, a heterogeneidade característica dos materiais.

A resistência ao rasgamento dos geotêxteis foi também determinada na direcção perpendicular à de fabrico dos materiais. O Quadro 5.12 resume os valores médios da resistência ao rasgamento dos geotêxteis na direcção perpendicular à de fabrico, bem como os correspondentes coeficientes de variação. Os resultados apresentados foram determinados a partir do ensaio de 10 provetes intactos de cada um dos geotêxteis.

Quadro 5.12 - Resistência ao rasgamento das amostras intactas dos geotêxteis (valores determinados na direcção perpendicular à de fabrico).

| Geotêxtil | Resistência ao rasgamento (N) |
|-----------|-------------------------------|
| B0-280    | 224 (17%)                     |
| B2-280    | 207 (9,7%)                    |
| B4-280    | 220 (11%)                     |
| B0-500    | 345 (17%)                     |
| B2-500    | 323 (8,6%)                    |
| B4-500    | 318 (13%)                     |
| P2-280    | 206 (19%)                     |
| P2-500    | 312 (22%)                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> apresentavam, na direcção perpendicular à de fabrico, resistências ao rasgamento entre os 206 N e os 224 N, enquanto que os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> possuíam valores de resistência ao rasgamento entre os 312 N e os 345 N. Os valores de resistência ao rasgamento determinados na direcção perpendicular à de fabrico foram inferiores aos valores determinados na direcção de fabrico.

### 5.3.6 - Ensaio de punçoamento estático

A resistência ao punçoamento estático dos geotêxteis e o respectivo deslocamento na força máxima foram determinados de acordo com a norma NP EN ISO 12236 (a descrição detalhada deste método de ensaio pode ser encontrada no ponto 4.8).

O Quadro 5.13 resume os valores médios da resistência ao punçoamento estático e do deslocamento na força máxima dos geotêxteis, bem como os coeficientes de variação correspondentes. Os valores apresentados foram obtidos pelo ensaio de 20 provetes intactos de cada um dos geotêxteis.

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam resistências ao punçoamento estático semelhantes entre si (entre os 1,40 e os 1,44 kN), mas ligeiramente menores que a resistência apresentada pelo geotêxtil P2-280 (1,66 kN). Os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> apresentaram resistências ao punçoamento estático entre os 2,51 (geotêxtil P2-500) e os 2,69 kN (geotêxtil B2-500). Os coeficientes de variação obtidos para a resistência ao punçoamento estático situaram-se entre os 5,1% e os 17%.

Quadro 5.13 - Resistência ao punçoamento estático e deslocamento na força máxima das amostras intactas dos geotêxteis.

| Geotêxtil | Resistência ao punçoamento (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|
| B0-280    | 1,44 (16%)                      | 73,9 (5,1%)                       |
| B2-280    | 1,40 (16%)                      | 79,7 (3,9%)                       |
| B4-280    | 1,40 (17%)                      | 74,0 (3,0%)                       |
| B0-500    | 2,59 (10%)                      | 70,2 (3,7%)                       |
| B2-500    | 2,69 (12%)                      | 68,1 (2,8%)                       |
| B4-500    | 2,61 (5,1%)                     | 67,9 (2,8%)                       |
| P2-280    | 1,66 (5,7%)                     | 65,3 (2,8%)                       |
| P2-500    | 2,51 (16%)                      | 63,3 (2,4%)                       |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 possuíam deslocamentos na força máxima semelhantes (entre os 73,9 e os 79,7 mm) e ligeiramente superiores ao deslocamento na força máxima apresentado pelo geotêxtil P2-280 (65,3 mm). Os deslocamentos na força máxima dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> foram ligeiramente inferiores aos dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>. Os coeficientes de variação obtidos para o deslocamento na força máxima foram relativamente pequenos (entre 2,4% e 5,1%) (ao contrário da maioria dos coeficientes de variação obtidos para as propriedades determinadas anteriormente).

A Figura 5.6 ilustra as curvas médias força-deslocamento obtidas para os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>, enquanto que a Figura 5.7 ilustra as curvas médias obtidas para os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup>.

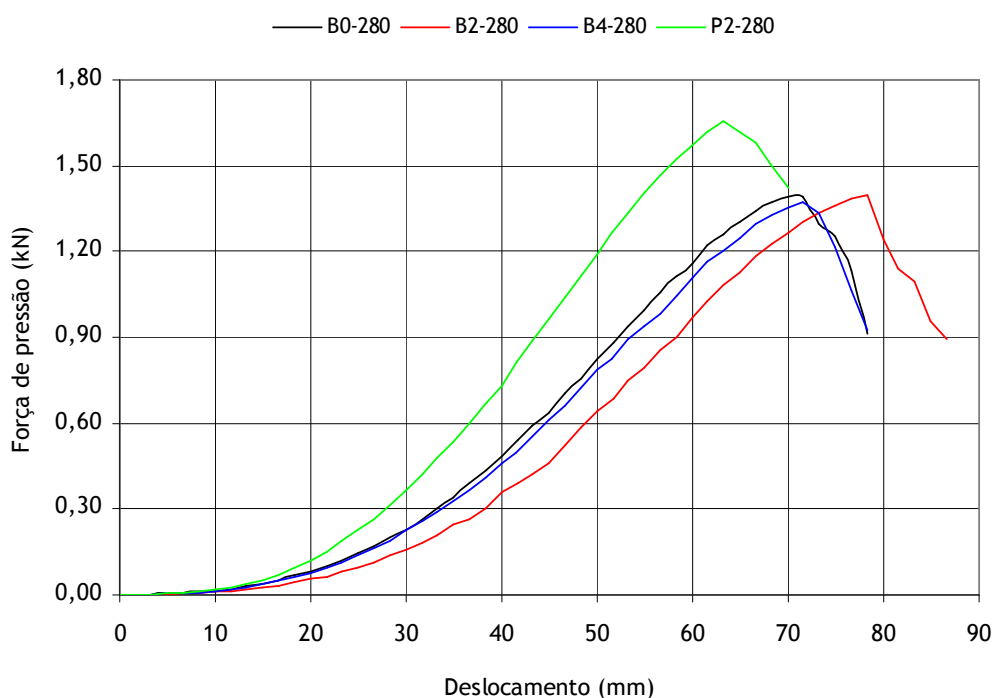


Figura 5.6 - Curvas médias força-deslocamento obtidas para os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>.

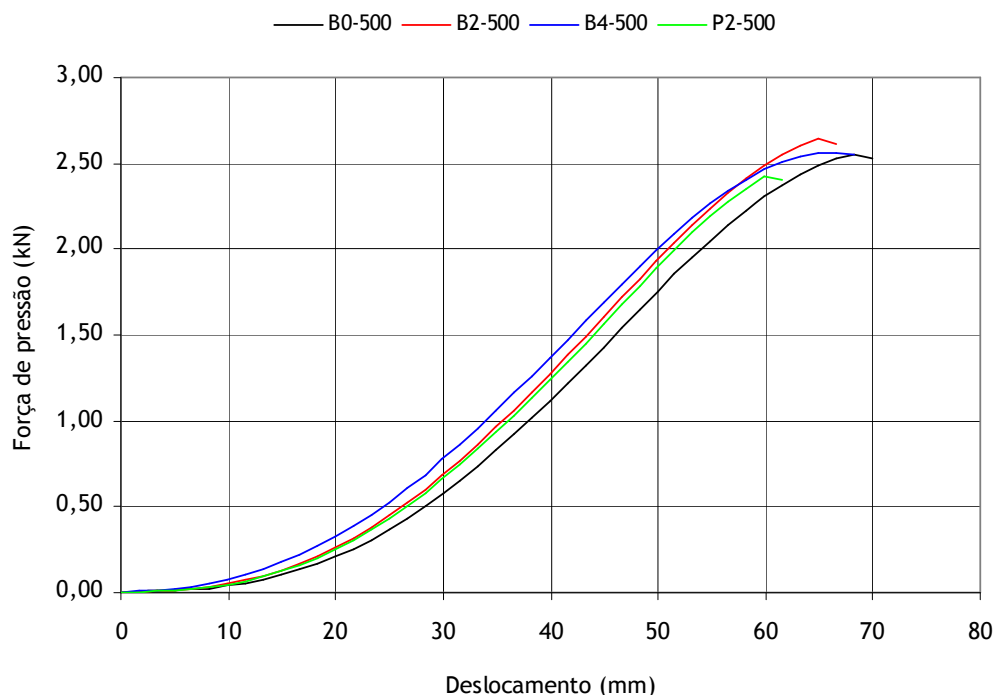


Figura 5.7 - Curvas médias força-deslocamento obtidas para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$ .

### 5.3.7 - Ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano

As características de permeabilidade à água (normal ao plano) dos geotêxteis foram determinadas de acordo com a norma NP EN ISO 11058 (uma descrição detalhada deste método de ensaio pode ser encontrada no ponto 4.9).

O Quadro 5.14 resume os valores médios das velocidades de escoamento  $v_{20}$  dos oito geotêxteis para diferentes perdas de carga hidráulica  $H$  ( $v_{20} H70$ ,  $v_{20} H56$ ,  $v_{20} H42$ ,  $v_{20} H28$  e  $v_{20} H14$ ), bem como os respectivos coeficientes de variação. Os valores apresentados foram obtidos através do ensaio de 5 provetes intactos de cada um dos geotêxteis.

Quadro 5.14 - Velocidades de escoamento  $v_{20} H70$ ,  $v_{20} H56$ ,  $v_{20} H42$ ,  $v_{20} H28$  e  $v_{20} H14$  obtidas para os vários geotêxteis.

| Geotêxtil | $v_{20} H70$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) | $v_{20} H56$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) | $v_{20} H42$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) | $v_{20} H28$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) | $v_{20} H14$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) |
|-----------|--|--|--|--|--|
| B0-280    | 132 (7,4%)                             | 114 (6,1%)                             | 91,4 (5,9%)                            | 66,2 (6,8%)                            | 36,6 (8,5%)                            |
| B2-280    | 142 (7,7%)                             | 122 (7,1%)                             | 99,2 (8,2%)                            | 70,5 (8,8%)                            | 39,4 (10%)                             |
| B4-280    | 128 (7,1%)                             | 108 (8,1%)                             | 86,7 (8,5%)                            | 61,8 (7,6%)                            | 34,4 (9,8%)                            |
| B0-500    | 53,9 (11%)                             | 45,1 (11%)                             | 35,3 (11%)                             | 24,9 (13%)                             | 12,7 (13%)                             |
| B2-500    | 51,1 (9,9%)                            | 43,8 (10%)                             | 34,9 (9,4%)                            | 24,2 (11%)                             | 13,2 (11%)                             |
| B4-500    | 51,4 (11%)                             | 42,8 (12%)                             | 33,5 (12%)                             | 23,3 (12%)                             | 12,1 (14%)                             |
| P2-280    | 113 (7,7%)                             | 94,1 (8,5%)                            | 73,9 (8,9%)                            | 52,9 (11%)                             | 29,5 (11%)                             |
| P2-500    | 51,8 (11%)                             | 43,3 (9,7%)                            | 33,9 (8,9%)                            | 23,9 (13%)                             | 12,4 (8,9%)                            |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



Os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  possuíam velocidades de escoamento  $v_{20}$  muito idênticas entre si (para a mesma perda de carga  $H$ ), mas bastante superiores às velocidades de escoamento dos geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$ . Os coeficientes de variação obtidos situaram-se entre os 5,9% e os 14%. A Figura 5.8 compara as curvas médias de regressão quadrática do tipo  $H = f(v_{20})$  dos vários geotêxteis.

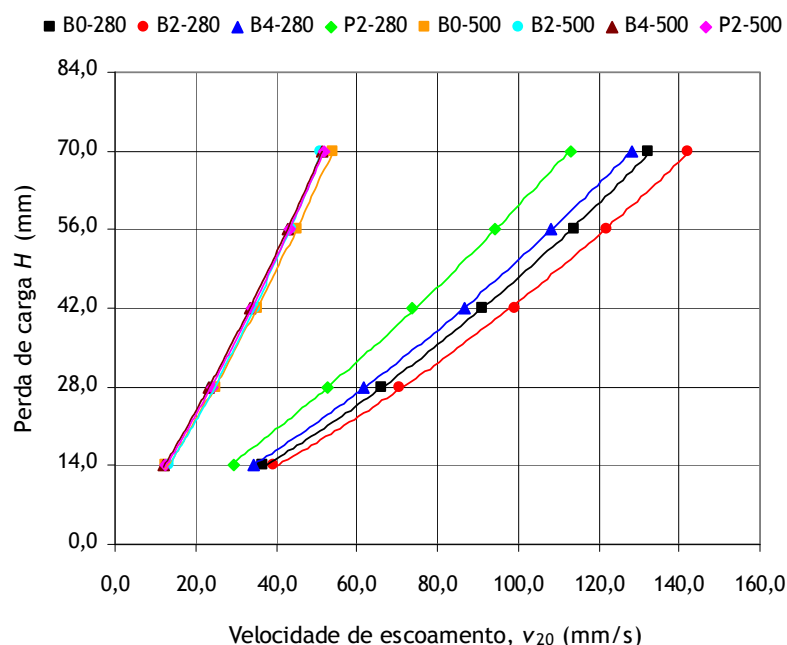


Figura 5.8 - Curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  obtidas para os vários geotêxteis.

As velocidades de escoamento médias para uma perda de carga hidráulica de 50 mm ( $v_{20} \text{ H50}$ ) e as permissividades médias para a mesma perda de carga ( $\Psi \text{ H50}$ ) obtidas para cada um dos geotêxteis, bem como os respectivos coeficientes de variação, encontram-se resumidas no Quadro 5.15.

Quadro 5.15 -  $v_{20} \text{ H50}$  médias e  $\Psi \text{ H50}$  médias obtidas para os vários geotêxteis.

| Geotêxtil | $v_{20} \text{ H50}^*$<br>( $\text{mm.s}^{-1}$ ) | $\Psi \text{ H50}$<br>( $\text{s}^{-1}$ ) |
|-----------|--|---|
| B0-280    | 104 (6,7%)                                       | 2,09 (6,7%)                               |
| B2-280    | 112 (7,7%)                                       | 2,23 (7,7%)                               |
| B4-280    | 99,3 (8,2%)                                      | 1,99 (8,2%)                               |
| B0-500    | 40,9 (11%)                                       | 0,82 (11%)                                |
| B2-500    | 39,7 (10%)                                       | 0,79 (10%)                                |
| B4-500    | 38,8 (12%)                                       | 0,78 (12%)                                |
| P2-280    | 85,9 (8,6%)                                      | 1,72 (8,6%)                               |
| P2-500    | 39,4 (10%)                                       | 0,79 (10%)                                |

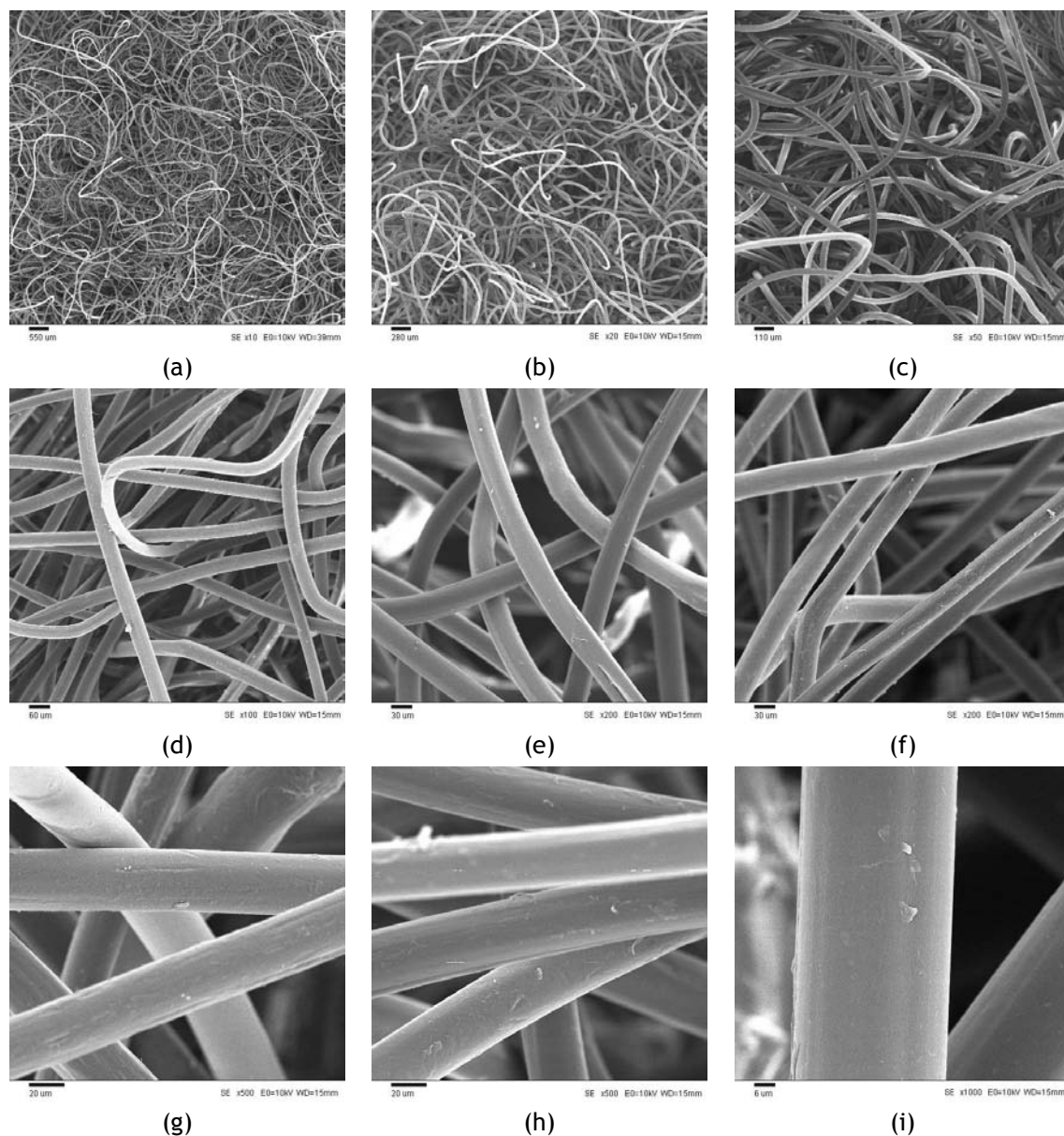
(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$   
(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  possuíam  $v_{20} \text{ H50}$  idênticas entre si (entre os 85,9 e os 112  $\text{mm.s}^{-1}$ ), mas bastante superiores às  $v_{20} \text{ H50}$  dos geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  (entre os 38,8 e os 40,9  $\text{mm.s}^{-1}$ ). Os coeficientes de variação obtidos situaram-se entre os 6,5% e os 12%.

As  $\Psi H50$  obtidas para os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$  foram idênticas entre si (valores entre os  $1,72$  e os  $2,23 \text{ s}^{-1}$ ), mas bastante maiores que as  $\Psi H50$  obtidas para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  (valores entre os  $0,78$  e os  $0,82 \text{ s}^{-1}$ ).

### 5.3.8 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X

A Figura 5.9 ilustra várias imagens obtidas por MEV de uma amostra intacta do geotêxtil B2-500. As imagens com menores ampliações mostram a aleatoriedade existente na disposição das fibras de um geotêxtil não-tecido (Figuras 5.9a-5.9d). Por sua vez, as imagens com maiores ampliações (Figuras 5.9e-5.9k) mostram em pormenor o aspecto das fibras de PP que constituem o geotêxtil B2-500. A superfície das fibras de PP é relativamente lisa, apenas com algumas pequenas irregularidades (em algumas zonas foram observadas pequenas partículas por cima das fibras de PP - poeiras depositadas durante o fabrico, armazenamento ou manuseamento do material).



(a Figura 5.9 continua na página seguinte)

(continuação da Figura 5.9)

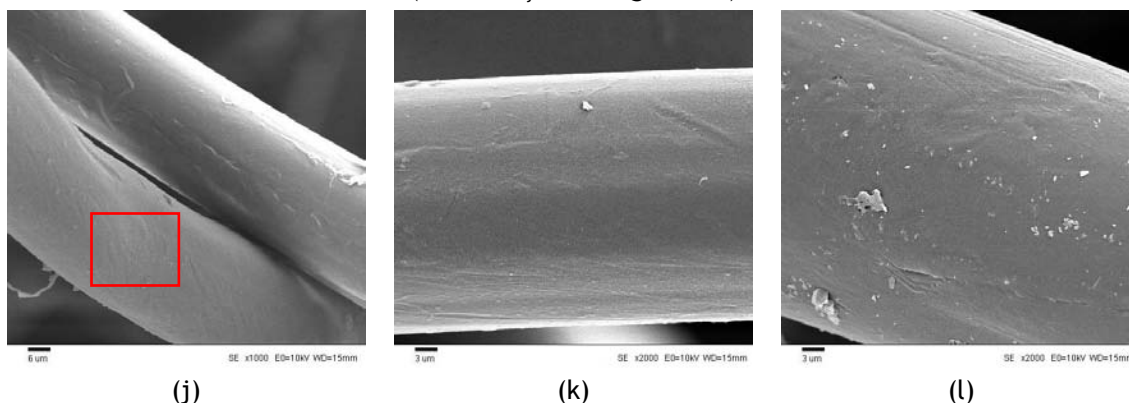


Figura 5.9 - Imagens obtidas por MEV de uma amostra intacta do geotêxtil B2-500: (a) x10; (b) x20; (c) x50; (d) x100; (e) x200; (f) x200; (g) x500; (h) x500; (i) x1000; (j) x1000; (k) x2000; (l) x2000.

O aspecto das amostras intactas dos restantes geotêxteis (imagens não apresentadas) era idêntico ao aspecto das amostras intactas do geotêxtil B2-500. A zona delimitada a vermelho na Figura 5.9j foi analisada por espectroscopia de raio X (Figura 5.10).

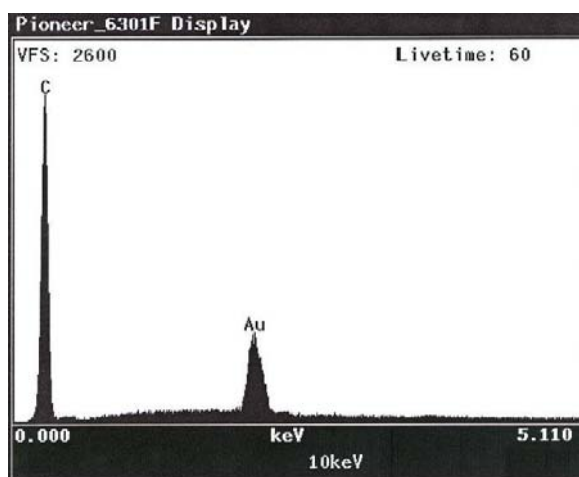


Figura 5.10 - Espectro de raio X de uma fibra intacta do geotêxtil B2-500 (zona delimitada a vermelho na Figura 5.9j).

A fibra do geotêxtil B2-500 era constituída unicamente por carbono (as análises por raio X permitem a detecção do carbono até ao urânio); o ouro existente no espectro de raio X do geotêxtil B2-500 é proveniente do revestimento aplicado para tornar a amostra electricamente condutora (o ouro está presente em todos os espectros de raio X efectuados neste trabalho). Os espectros de raio X obtidos noutras zonas do geotêxtil B2-500 ou para as amostras intactas dos restantes geotêxteis (espectros não apresentados) eram idênticos ao espectro ilustrado na Figura 5.10.

#### 5.4 - Princípios gerais de amostragem e de preparação de provetes

A amostragem e a preparação de provetes foram efectuadas, sempre que possível, de acordo com as orientações descritas na norma NP EN ISO 9862:2007 (Geossintéticos: Amostragem e preparação de provetes).

Os geotêxteis estudados neste trabalho foram fornecidos ao LGS da FEUP sob a forma de rolos. Os rolos estavam embrulhados em plástico negro (para proteger os geotêxteis da acção da luz solar) e não possuíam danos visíveis; os rolos foram armazenados à temperatura ambiente e em local seco.

Os provetes foram cortados dispersos por toda a largura do rolo, excluindo os bordos laterais (pelo menos 250 mm de cada lado do rolo foram desprezados). Os provetes para um mesmo ensaio foram cortados, sempre que possível, em diferentes posições longitudinais e transversais do rolo (provetes cortados em diagonais). As primeiras duas voltas de cada rolo não foram usadas para a preparação de provetes. Não foram cortados provetes em zonas com áreas sujas, com vincos, com orifícios ou com outros danos de origem accidental ocorridos após o fabrico dos materiais. A Figura 5.11 ilustra o esquema de corte e de identificação dos provetes.

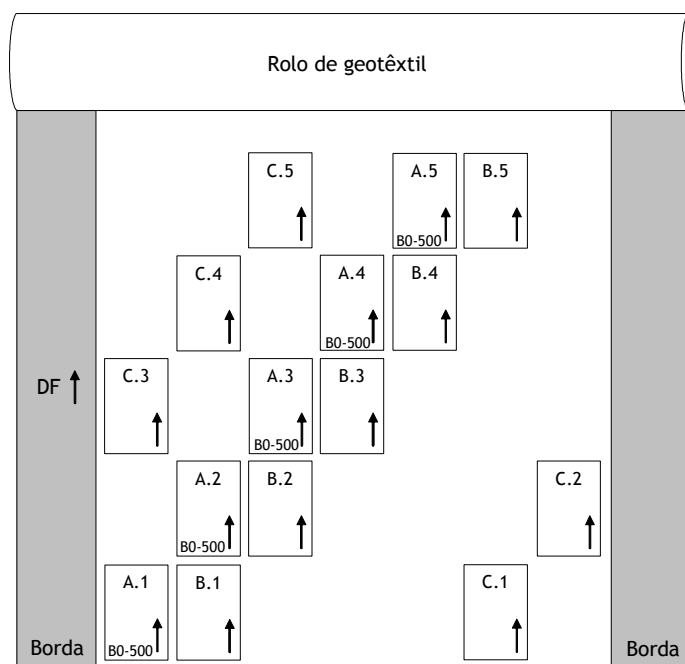


Figura 5.11 - Esquema do corte e da identificação dos provetes (DF - direcção de fabrico).

Os provetes foram identificados (marcados com uma caneta adequada) através de um código único de modo a evitar quaisquer dúvidas quanto à sua identidade. A designação atribuída aos geotêxteis e a direcção de fabrico também foram marcados em todos os provetes cortados (os provetes para os ensaios de durabilidade foram cortados todos na direcção de fabrico; os provetes foram cortados na direcção perpendicular à de fabrico apenas para caracterização das propriedades mecânicas, nesta direcção, das amostras intactas).

Os provetes para caracterização imediata foram cortados com as dimensões próprias para os ensaios de caracterização a que se destinavam. De um modo geral, os provetes para exposição aos agentes de degradação também foram logo cortados com as dimensões próprias para os ensaios posteriores de caracterização. Em algumas situações, os provetes para expor aos agentes de degradação foram cortados com dimensões superiores às necessárias e, apenas depois da exposição, cortados com as dimensões adequadas para os ensaios de caracterização a que se destinavam.

### 5.5 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se à descrição das características e/ou propriedades dos geotêxteis de PP estudados neste trabalho. Foram também descritos os princípios gerais usados na amostragem e na preparação dos provetes dos geotêxteis para os vários ensaios de caracterização e de durabilidade.

A caracterização física dos geotêxteis englobou a determinação da massa por unidade de área e da espessura; os materiais foram também caracterizados por MEV. Os geotêxteis foram caracterizados mecanicamente através de ensaios de tracção-extensão, de rasgamento e de punçoamento estático. A caracterização hidráulica envolveu a determinação da permeabilidade à água normal ao plano. A composição elementar dos materiais foi analisada por espectroscopia de raio X. Os geotêxteis foram também analisados por espectroscopia de infravermelho e o teor de C944 existente nos materiais foi determinado por HPLC-UV (resultados apresentados no Capítulo 4).

Os danos ocorridos nos geotêxteis durante a exposição aos diferentes agentes de degradação serão avaliados através da comparação dos resultados obtidos para os materiais de referência (resultados apresentados neste capítulo) com os resultados obtidos para os materiais expostos.



# CAPÍTULO 6

## Determinação da resistência dos geotêxteis a líquidos

### 6.1 - Introdução

Em algumas aplicações, os geossintéticos podem estar em contacto, mais ou menos prolongado, com soluções aquosas com carácter ácido ou alcalino. Por exemplo, os geotêxteis aplicados nos aterros de resíduos podem estar em contacto com lixiviados; por sua vez, os materiais usados em estruturas de protecção costeira podem estar em contacto com a água do mar. Assim, é importante avaliar o efeito dos líquidos na durabilidade destes materiais.

Neste capítulo, procede-se à avaliação do efeito da imersão em vários líquidos na durabilidade dos geotêxteis. Os geotêxteis foram imersos em várias soluções químicas com diferentes concentrações, durante diversos períodos de tempo e a diferentes temperaturas. Após os ensaios, as propriedades dos provetes expostos foram comparadas com as propriedades dos provetes de referência.

Primeiro, serão descritas as condições experimentais dos diversos ensaios de imersão realizados. Em seguida, serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos.

### 6.2 - Descrição experimental

#### 6.2.1 - Procedimento geral dos ensaios, equipamento e reagentes

A resistência dos geotêxteis a líquidos foi determinada através da imersão dos materiais em várias soluções químicas, e posterior avaliação das propriedades dos materiais. Os provetes imersos (pelo menos 6 provetes) possuíam 400 mm de comprimento e 50 mm de largura.

Os ensaios de imersão a temperaturas elevadas foram realizados num banho termostaticado (marca *GFL*, modelo *1003*) (Figura 6.1). O banho utilizado tinha um interior em aço inoxidável e possuía um sistema de fecho de modo a impedir (ou pelo menos minimizar) a ocorrência de perdas gasosas. O Quadro 6.1 resume as principais características do banho termostático usado.

Os ensaios de imersão à temperatura ambiente foram efectuados em recipientes. A parte de cima dos recipientes foi isolada com plástico preto, de modo a proteger os materiais da acção da luz.

Após a imersão, os provetes foram lavados (com água desionizada) e foram secos, por um período mínimo de 7 dias, em local seco e ao abrigo da luz. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3 (a descrição deste método de ensaio encontra-se no ponto 4.6).

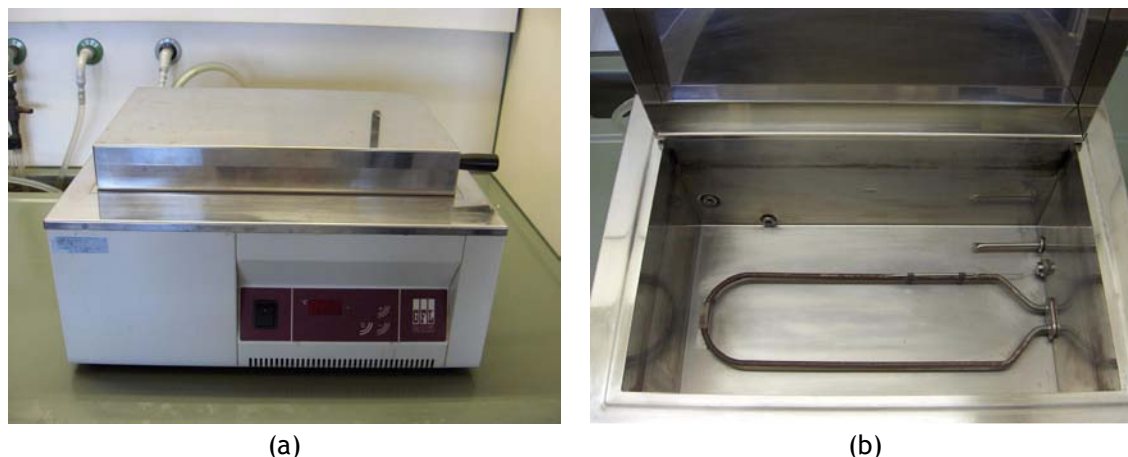


Figura 6.1 - Banho termostatizado: (a) vista exterior; (b) vista interior: resistência de aquecimento.

Quadro 6.1 - Principais características do banho usado nos ensaios de imersão.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Dimensões interiores    | 400 mm x 245 mm x 145 mm<br>(comprimento, largura, altura)                           |
| Volume                  | 14 L   |
| Temperatura de trabalho | $T_{\text{AMBI}} + 5,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ até $99,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Precisão de temperatura | $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$   |

( $T_{\text{AMBI}}$  - temperatura ambiente)

A água utilizada para a preparação das diversas soluções de imersão (e para a lavagem dos provetes) foi purificada através de um sistema de osmose inversa com tratamento microbiológico, seguido de desionização em resinas de permuta iónica de leito misto. As características dos diversos reagentes usados na preparação das soluções de imersão encontram-se resumidas no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 - Principais características dos reagentes utilizados na preparação das soluções de imersão.

| Reagente                 | Fórmula química                                      | Pureza              | Fabricante     |
|--------------------------|--|---------------------|----------------|
| Ácido sulfúrico          | $\text{H}_2\text{SO}_4$                              | <i>pro analysis</i> | Merck          |
| Ácido nítrico            | $\text{HNO}_3$                                       | <i>pro analysis</i> | Riedel-de-Häen |
| Hidróxido de cálcio      | $\text{Ca}(\text{OH})_2$                             | <i>pro analysis</i> | Merck          |
| Hidróxido de sódio       | $\text{NaOH}$  | <i>pro analysis</i> | Merck          |
| Cloreto de sódio         | $\text{NaCl}$  | <i>pro analysis</i> | Merck          |
| Nitrato de ferro (III) * | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | <i>pro analysis</i> | Merck          |

(\*o nitrato de ferro (III) vai ser designado simplesmente por “nitrato de ferro”)

Os reagentes utilizados para a preparação das soluções de imersão foram pesados numa balança de marca *Mettler*, modelo *PE200*. O pH das soluções de imersão foi determinado num medidor de pH da marca *Metrohm*, modelo *605*, equipado com um eléctrodo de pH *Metrohm* (Ref. 6.02.02.000).



### 6.2.2 - Ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447

A resistência dos geotêxteis a líquidos foi avaliada segundo as normas EN 14030:2001 (*Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids*) e EN 12447:2001 (*Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to hydrolysis in water*).

A norma EN 14030 descreve dois métodos para avaliar a resistência dos geotêxteis a líquidos: um para determinar a resistência em meio ácido (método A) e o outro para determinar a resistência em meio alcalino (método B). Por sua vez, a norma EN 12447 descreve uma metodologia para avaliar a resistência dos geotêxteis à hidrólise. O Quadro 6.3 e o Quadro 6.4 resumem, respectivamente, as condições experimentais dos ensaios de imersão realizados de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447.

Quadro 6.3 - Ensaios de imersão de acordo com a norma EN 14030.

| Ensaio de imersão             | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|-------------------------------|---|---------------------|
| Controlo                      | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7,0)  | 60 °C, 1 hora       |
| Meio ácido I<br>(Método A)    | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,025 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1,6) | 60 °C, 3 dias       |
| Meio alcalino I<br>(Método B) | Ca(OH) <sub>2</sub> (2,5 g.L <sup>-1</sup> )*<br>(pH ≈ 12,4)              | 60 °C, 3 dias       |

\*Solução saturada (solubilidade Ca(OH)<sub>2</sub> (25°C) ≈ 0,87 g.L<sup>-1</sup>)

Quadro 6.4 - Ensaios de imersão de acordo com a norma EN 12447.

| Ensaio de imersão | Agente de degradação           | Condições do ensaio |
|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| Controlo          | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7,0) | 95 °C, 1 hora       |
| Hidrólise I       | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7,0) | 95 °C, 28 dias      |

As normas EN 14030 e EN 12447 referem, igualmente, a realização de ensaios de controlo, em que os geotêxteis são imersos em água desionizada, durante 1 hora, às temperaturas de 60 °C e 95°C, respectivamente.

### 6.2.3 - Ensaios de imersão a 90 °C

Os geotêxteis B0-500 e B4-500 foram sujeitos a ensaios de imersão sob condições mais drásticas que as condições definidas na norma EN 14030. Os materiais foram imersos em soluções ácidas e básicas de maior concentração, durante um intervalo de tempo maior e a uma temperatura mais elevada. O Quadro 6.5 resume as condições experimentais das imersões realizadas em meio ácido. As condições experimentais das imersões realizadas em meio alcalino encontram-se no Quadro 6.6.

Quadro 6.5 - Ensaio de imersão a 90 °C em soluções ácidas.

| Ensaio de imersão | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|-------------------|---|---------------------|
| Meio ácido II     | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1,0)                                   | 90 °C, 7 dias       |
| Meio ácido III    | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1,0)                                   | 90 °C, 14 dias      |
| Meio ácido IV     | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1,0)                                   | 90 °C, 28 dias      |
| Meio ácido V      | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH < 1,0)                                   | 90 °C, 28 dias      |
| Meio ácido VI     | HNO <sub>3</sub> (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH < 1,0)   | 90 °C, 28 dias      |
| Meio ácido VII    | HNO <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>(0,5 mol.L <sup>-1</sup> / 0,5 mol.L <sup>-1</sup> ) | 90 °C, 14 dias      |

Quadro 6.6 - Ensaio de imersão a 90 °C em soluções alcalinas.

| Ensaio de imersão | Agente de degradação                           | Condições do ensaio |
|-------------------|--|---------------------|
| Meio alcalino II  | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13,0) | 90 °C, 7 dias       |
| Meio alcalino III | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13,0) | 90 °C, 14 dias      |
| Meio alcalino IV  | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13,0) | 90 °C, 28 dias      |
| Meio alcalino V   | NaOH (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH > 13,0) | 90 °C, 28 dias      |

O geotêxtil B0-500 foi exposto a todos os meios ácidos descritos no Quadro 6.5, enquanto que o geotêxtil B4-500 foi apenas exposto aos meios ácidos II, IV e V. O geotêxtil B4-500 não foi imerso em ácido nítrico porque ambas as imersões realizadas com o geotêxtil B0-500 provocaram sérios danos ao banho termostático (degradação dos vedantes que isolam o interior do banho, com consequente perda de líquido de imersão para a zona eléctrica do equipamento).

O geotêxtil B0-500 foi exposto a todos os meios alcalinos descritos no Quadro 6.6, ao passo que o geotêxtil B4-500 foi apenas exposto aos meios alcalinos II e V.

#### 6.2.4 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente

Os geotêxteis B0-500 e B2-500 foram também imersos em várias soluções à temperatura ambiente, durante um período de tempo relativamente longo (1 ano). Os materiais foram imersos em ácido sulfúrico, hidróxido de sódio, água, cloreto de sódio, nitrato de ferro e num lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos. A solução de nitrato de ferro foi acidulada para pH 2 através da adição de ácido nítrico, para obter uma solução límpida (na ausência de acidulação, ocorreria a formação de hidróxido de ferro (III) e a solução poderia ficar turva). As condições experimentais dos ensaios de imersão realizados à temperatura ambiente estão resumidas no Quadro 6.7.

Quadro 6.7 - Ensaio de imersão realizados à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão        | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|--------------------------|---|---------------------|
| Meio ácido VIII          | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH < 1,0)                     | ≈ 20 °C, 1 ano      |
| Meio alcalino VI         | NaOH (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH > 13,0)  | ≈ 20 °C, 1 ano      |
| Hidrólise II             | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7,0)  | ≈ 20 °C, 1 ano      |
| Cloreto de sódio         | NaCl (10 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 6,5)  | ≈ 20 °C, 1 ano      |
| Nitrato de ferro (III) * | Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> .9H <sub>2</sub> O (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2,0)** | ≈ 20 °C, 1 ano      |
| Lixiviado                | Lixiviado<br>(pH ≈ 9,0)   | ≈ 20 °C, 1 ano      |

(\*o nitrato de ferro (III) vai ser designado simplesmente por “nitrato de ferro”)

(\*\*pH ajustado para pH 2 pela adição de ácido nítrico)

### 6.3 - Resultados experimentais

#### 6.3.1 - Ensaio de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447

##### 6.3.1.1 - Considerações iniciais

As massas e as dimensões dos geotêxteis não sofreram alterações significativas durante as imersões de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. Os ensaios de controlo (imersão durante 1 hora) não provocaram alterações relevantes nas propriedades dos materiais, pelo que os seus resultados não serão apresentados.

Em seguida, procede-se à apresentação detalhada dos resultados obtidos para os geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500. Os resultados obtidos para os geotêxteis com menor massa por unidade de área serão apenas apresentados em termos de resistência residual (dado não terem sido observadas grandes diferenças entre os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> e os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>).

##### 6.3.1.2 - Geotêxtil B0-500

O Quadro 6.8 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447. Os valores da rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20% de extensão), da robustez e da robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 6.9. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão, estão representadas na Figura 6.2.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 manteve-se praticamente inalterada após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447 (resistências residuais próximas dos 100%). A extensão na força máxima sofreu uma diminuição após o ensaio de hidrólise (redução de 75,0% para 62,8%). As imersões de acordo com a norma EN 14030 não causaram alterações muito significativas na extensão na força máxima do geotêxtil B0-500.

Quadro 6.8 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,2 (14%)                                  | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido I      | 26,7 (5,9%)                                 | 72,3 (7,6%)                  | <b>102</b>               |
| Meio alcalino I   | 27,0 (5,0%)                                 | 80,4 (8,0%)                  | <b>103</b>               |
| Hidrólise I       | 26,0 (18%)                                  | 62,8 (6,0%)                  | <b>99,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.9 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 27,0                                      | 30,2                                      | 31,3                                       | 35,3                                       | 1117                           | ---                   |
| Meio ácido I      | 25,0                                      | 28,7                                      | 31,1                                       | 35,6                                       | 926                            | <b>82,9</b>           |
| Meio alcalino I   | 26,8                                      | 30,6                                      | 33,5                                       | 38,5                                       | 1138                           | <b>102</b>            |
| Hidrólise I       | 25,4                                      | 31,6                                      | 35,4                                       | 39,9                                       | 852                            | <b>76,3</b>           |

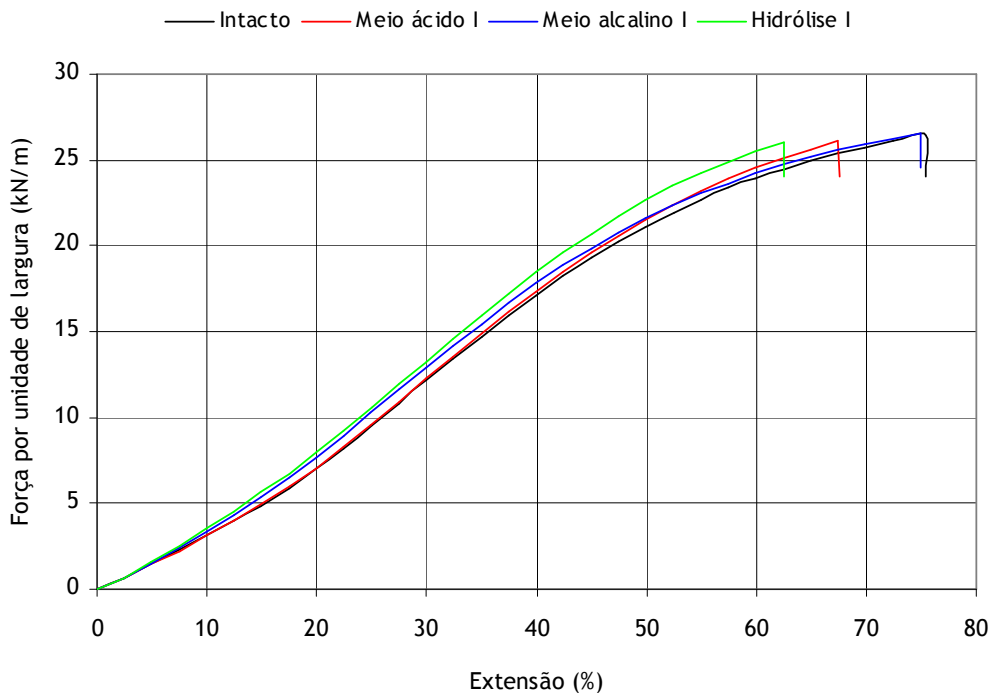


Figura 6.2 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

A robustez do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição após os ensaios de imersão em meio ácido (robustez residual de 82,9%) e de hidrólise (robustez residual de 76,3%); após a imersão em meio alcalino, o geotêxtil B0-500 possuía uma robustez residual de 102%. Os valores da rigidez secante (a 2%, 5%, 10% e 20%) não sofreram grandes alterações em relação aos valores de referência.

### 6.3.1.3 - Geotêxtil B2-500

A resistência à tracção, a extensão na força máxima e a resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447, encontram-se resumidas no Quadro 6.10. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser encontrados no Quadro 6.11. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão, encontram-se ilustradas na Figura 6.3.

Quadro 6.10 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Meio ácido I      | 26,7 (7,9%)                                  | 73,8 (2,7%)                  | <b>100</b>               |
| Meio alcalino I   | 26,1 (7,8%)                                  | 81,5 (8,3%)                  | <b>98,1</b>              |
| Hidrólise I       | 26,2 (6,3%)                                  | 65,7 (2,5%)                  | <b>98,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | J <sub>SEC</sub> 5% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | J <sub>SEC</sub> 10% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | J <sub>SEC</sub> 20% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|--|--|---|---|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 32,5                                       | 35,1                                       | 35,9  | 40,0  | 1076                            | ---                   |
| Meio ácido I      | 26,6                                       | 31,4                                       | 35,2  | 40,7  | 1165                            | <b>108</b>            |
| Meio alcalino I   | 24,2                                       | 27,7                                       | 30,0  | 35,0  | 1203                            | <b>112</b>            |
| Hidrólise I       | 27,9                                       | 33,4                                       | 36,7  | 40,7  | 910                             | <b>84,6</b>           |

À semelhança do geotêxtil B0-500, a resistência à tracção do geotêxtil B2-500 também se manteve praticamente inalterada após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447; por sua vez, a extensão na força máxima sofreu algumas pequenas variações.

A robustez do geotêxtil B2-500 diminuiu após o ensaio de hidrólise (robustez residual de 84,6%). As imersões em meio ácido e em meio alcalino não causaram uma diminuição da robustez do geotêxtil B2-500 (robustez residual superior a 100% em ambos os casos).

Os valores da rigidez secante não sofreram alterações muito significativas relativamente aos valores de referência; apenas ocorreu uma pequena diminuição da rigidez do material após a imersão em meio alcalino (diminuição essa que não foi observada para o geotêxtil B0-500). Assim, a diminuição de rigidez observada para o geotêxtil B2-500 após imersão em meio alcalino (diminuição facilmente visível na Figura 6.3) poderá ser apenas devida à heterogeneidade existente nos materiais.

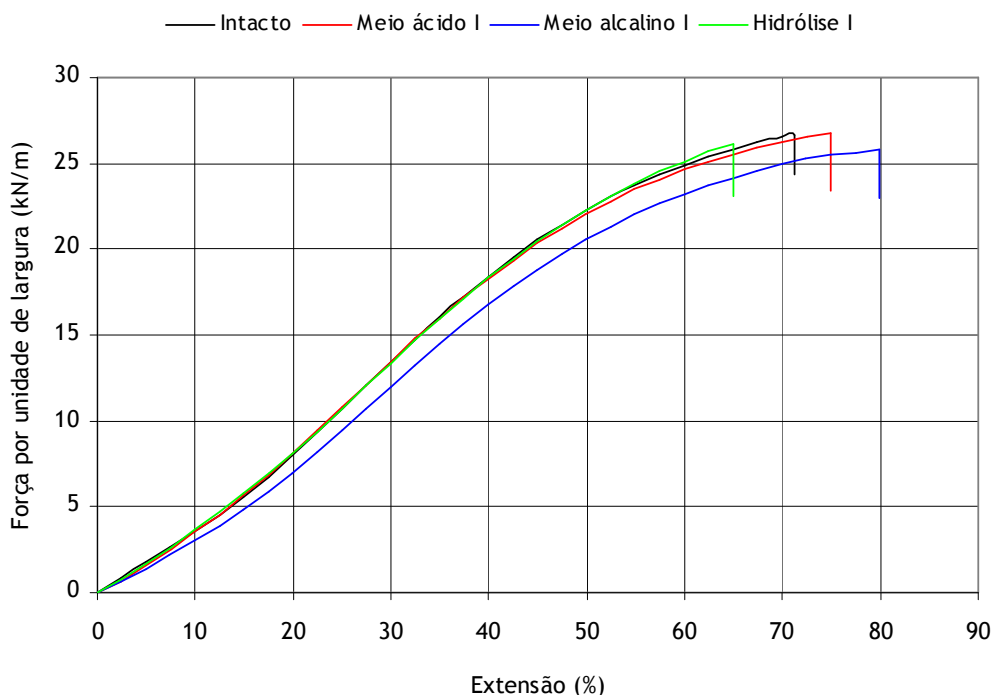


Figura 6.3 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

#### 6.3.1.4 - Geotêxtil B4-500

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447, encontram-se resumidas nos Quadros 6.12 e 6.13. As curvas médias força-extensão encontram-se representadas na Figura 6.4.

Quadro 6.12 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido I      | 26,4 (10%)                                   | 83,0 (4,4%)                  | <b>95,7</b>              |
| Meio alcalino I   | 27,1 (8,1%)                                  | 77,4 (8,3%)                  | <b>98,2</b>              |
| Hidrólise I       | 27,4 (14%)                                   | 58,2 (5,5%)                  | <b>99,3</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| Meio ácido I      | 25,9  | 30,2  | 32,7   | 36,7   | 1218                            | <b>103</b>            |
| Meio alcalino I   | 28,3  | 33,0  | 37,1   | 42,0   | 1115                            | <b>93,8</b>           |
| Hidrólise I       | 34,1  | 41,3  | 45,1   | 48,8   | 834                             | <b>70,2</b>           |

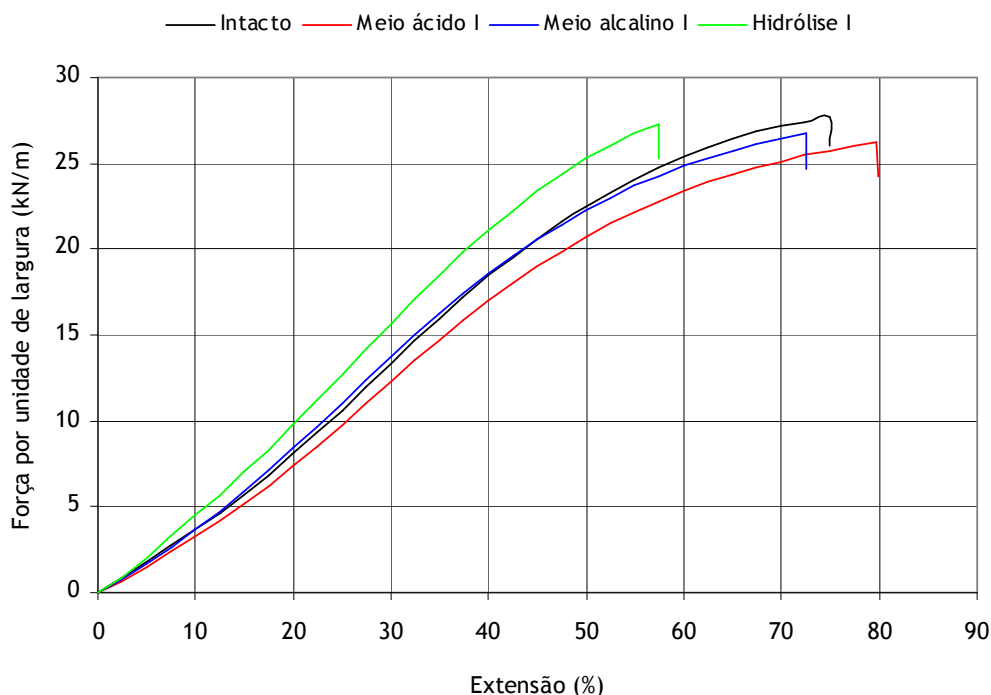


Figura 6.4 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

À semelhança dos geotêxteis anteriores, a resistência à tracção do geotêxtil B4-500 também não sofreu alterações muito significativas após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. A extensão na força máxima sofreu uma redução significativa após o ensaio de hidrólise (de 74,1% para 58,2%). Depois dos ensaios de imersão de acordo com a norma EN 14030, os valores das extensões na força máxima não eram muito diferentes dos valores de referência.

Tal como para os geotêxteis B0-500 e B2-500, a robustez do geotêxtil B4-500 também diminuiu após o ensaio de hidrólise (robustez residual de 70,2%). Após as imersões segundo a norma EN 14030, o geotêxtil B4-500 apresentava uma robustez residual de 103% (após imersão em meio ácido) e de 93,8% (após imersão em meio alcalino).

Os valores da rigidez secante não sofreram alterações muito significativas após as imersões segundo a norma EN 14030 (apenas uma pequena redução após a imersão em meio ácido). Depois do ensaio de hidrólise, o geotêxtil B4-500 apresentava valores de rigidez secante superiores aos seus valores de referência.

#### 6.3.1.5 - Geotêxtil P2-500

A resistência à tracção, a extensão na força máxima e a resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447, estão resumidas no Quadro 6.14. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual podem ser encontrados no Quadro 6.15. A Figura 6.5 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e depois dos ensaios de imersão.

Quadro 6.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 25,6 (12%)                                   | 63,0 (9,0%)                  | ---                      |
| Meio ácido I      | 25,7 (9,2%)                                  | 65,5 (5,6%)                  | <b>100</b>               |
| Meio alcalino I   | 26,7 (13%)                                   | 65,1 (3,4%)                  | <b>104</b>               |
| Hidrólise I       | 25,6 (8,2%)                                  | 58,1 (4,6%)                  | <b>100</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 31,0  | 33,8  | 35,1   | 39,7   | 848                             | ---                   |
| Meio ácido I      | 27,5  | 30,2  | 31,8   | 36,2   | 863                             | <b>102</b>            |
| Meio alcalino I   | 30,7  | 34,1  | 35,6   | 39,9   | 862                             | <b>102</b>            |
| Hidrólise I       | 33,6  | 36,7  | 37,9   | 42,4   | 669                             | <b>78,9</b>           |

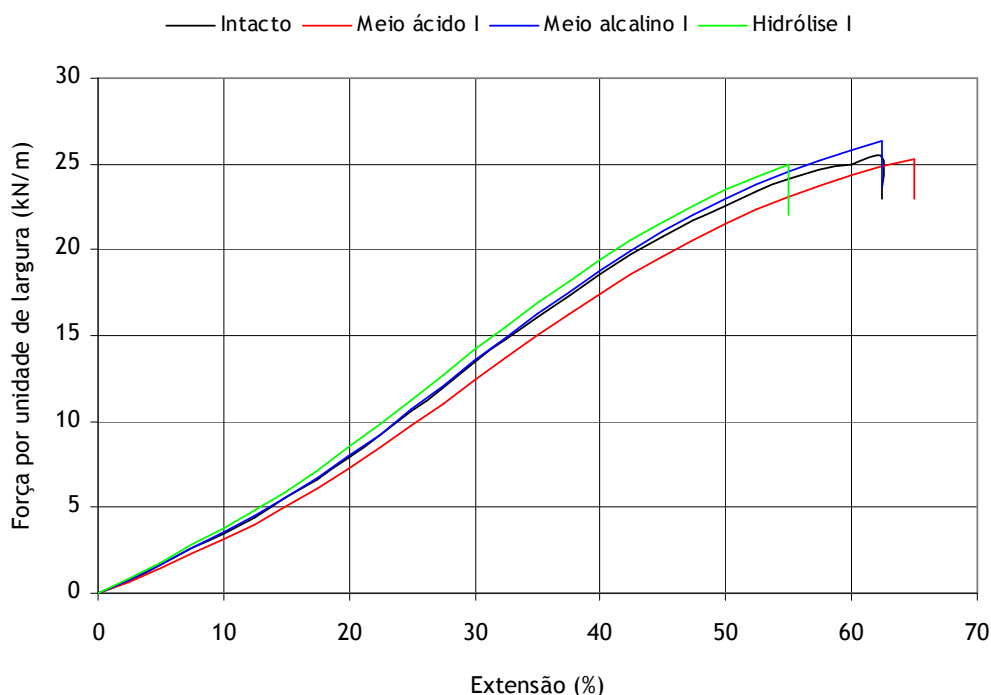


Figura 6.5 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

Tal como para os geotêxteis brancos, a resistência à tracção do geotêxtil P2-500 também não sofreu alterações relevantes após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. A extensão na força máxima não sofreu grandes variações após os vários ensaios de imersão; a maior variação ocorreu após o ensaio de hidrólise (de 63,0% para 58,1%).



À semelhança do que aconteceu para os geotêxteis brancos, a robustez do geotêxtil P2-500 também diminuiu após o ensaio de hidrólise (robustez residual de 78,9%). Depois dos ensaios de acordo com a norma EN 14030, a robustez do geotêxtil P2-280 não sofreu grandes alterações (robustez residual de 102%). Os valores da rigidez secante também não sofreram alterações muito significativas.

#### 6.3.1.6 - Geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>

Os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> apresentaram uma boa resistência aos ensaios de imersão realizados de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. Os resultados obtidos para os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> foram muito semelhantes aos resultados apresentados para os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup>. Assim, para os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> apresentam-se apenas as resistências residuais dos materiais após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447 (Quadro 6.16).

Quadro 6.16 - Resistências residuais dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> após os ensaios de imersão segundo as normas EN 14030 e EN 12447.

| Ensaio de imersão | Resistência residual (%) |        |        |        |
|-------------------|--------------------------|--------|--------|--------|
|                   | B0-280                   | B2-280 | B4-280 | P2-280 |
| Meio ácido I      | 101                      | 99,6   | 106    | 98,6   |
| Meio alcalino I   | 99,2                     | 103    | 103    | 100    |
| Hidrólise I       | 99,8                     | 102    | 104    | 99,1   |

Os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> possuíam resistências residuais próximas de 100% depois das imersões segundo as normas EN 14030 e EN 12447. Os geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> e com 500 g.m<sup>-2</sup> apresentaram um comportamento muito semelhante durante os ensaios de imersão, não tendo sido encontradas diferenças que possam ser atribuídas ao facto dos materiais terem diferentes massas por unidade de área.

#### 6.3.1.7 - Considerações finais

As resistências à tracção dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> e 500 g.m<sup>-2</sup> não sofreram grandes alterações após os ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. Os ensaios de hidrólise causaram uma diminuição da robustez dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (robustez residual entre 70,2% e 84,6%). Relativamente às imersões em meio ácido e em meio alcalino, a extensão na força máxima, a rigidez e a robustez dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> apresentaram algumas pequenas variações (sem nenhuma tendência evidente) que poderão ser apenas devidas à heterogeneidade dos materiais.

De um modo geral, os geotêxteis de PP evidenciaram uma boa resistência aos ensaios de imersão de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. A análise dos geotêxteis por MEV após os vários ensaios de imersão revelou a inexistência de alterações microscópicas nos materiais (o aspecto dos provetes expostos era idêntico ao aspecto dos provetes de referência).

### 6.3.2 - Ensaio de imersão a 90 °C

#### 6.3.2.1 - Resistência em meio ácido - geotêxtil B0-500

A resistência à tracção, a extensão na força máxima e a resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e depois dos vários ensaios de imersão, a 90 °C, em meio ácido (as condições experimentais dos ensaios foram descritas no ponto 6.2.3), encontram-se resumidas no Quadro 6.17. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser observados no Quadro 6.18.

Quadro 6.17 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,2 (14%)                                  | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido II     | 26,2 (11%)                                  | 66,1 (7,0%)                  | 100                      |
| Meio ácido III    | 25,4 (11%)                                  | 70,6 (4,6%)                  | 96,9                     |
| Meio ácido IV     | 26,2 (3,4%)                                 | 71,9 (6,6%)                  | 100                      |
| Meio ácido V      | 24,5 (5,4%)                                 | 73,6 (12%)                   | 93,5                     |
| Meio ácido VI     | 7,99 (17%)                                  | 21,5 (11%)                   | 30,5                     |
| Meio ácido VII    | 7,14 (22%)                                  | 18,5 (17%)                   | 27,2                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.18 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 27,0                                      | 30,2                                      | 31,3                                       | 35,3                                       | 1117                           | ---                   |
| Meio ácido II     | 24,3                                      | 30,9                                      | 34,8                                       | 39,1                                       | 925                            | 82,8                  |
| Meio ácido III    | 15,7                                      | 22,1                                      | 27,1                                       | 32,6                                       | 888                            | 79,5                  |
| Meio ácido IV     | 17,3                                      | 24,9                                      | 30,2                                       | 35,5                                       | 870                            | 77,9                  |
| Meio ácido V      | 15,2                                      | 21,3                                      | 26,0                                       | 31,1                                       | 772                            | 69,1                  |
| Meio ácido VI     | 22,0                                      | 31,5                                      | 38,4                                       | 32,1                                       | 79,7                           | 7,1                   |
| Meio ácido VII    | 37,3                                      | 43,7                                      | 46,4                                       | ---  | 64,9                           | 5,8                   |

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 não sofreu alterações após os 7 dias de imersão, a 90 °C, numa solução 0,1 mol.L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico (meio ácido II). O aumento do tempo de imersão não provocou uma diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B0-500. De facto, após 14 dias (meio ácido III) e 28 dias (meio ácido IV) de imersão em ácido sulfúrico 0,1 mol.L<sup>-1</sup>, o geotêxtil B0-500 apresentava resistências residuais muito elevadas (96,9% e 100%, respectivamente). A imersão do geotêxtil B0-500 nos meios ácidos II, III e IV provocou apenas pequenas variações na sua extensão na força máxima.

A robustez do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição após a imersão nos meios ácidos II, III e IV (robustez residual de 82,8%, 79,5% e 77,9%, respectivamente). A diminuição observada na robustez do geotêxtil B0-500 foi tanto maior quanto maior o tempo de imersão. Os valores da rigidez secante sofreram algumas variações (sem nenhuma tendência evidente) após a imersão do geotêxtil B0-500 nos meios ácidos II, III e IV.

A imersão numa solução 0,5 mol.L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico (meio ácido V) causou uma ligeira diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistência residual de 93,5%). No entanto, a extensão na força máxima não sofreu alterações muito significativas. A robustez do geotêxtil B0-500 depois da imersão no meio ácido V (robustez residual de 69,1%) era inferior à robustez apresentada após a imersão no meio ácido IV. Assim, o aumento da concentração de ácido sulfúrico de 0,1 mol.L<sup>-1</sup> para 0,5 mol.L<sup>-1</sup> provocou uma diminuição da resistência à tracção e da robustez do geotêxtil B0-500. A imersão no meio ácido V causou uma diminuição dos valores da rigidez secante do geotêxtil B0-500.

A imersão em ácido nítrico (meio ácido VI) provocou uma grande diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistência residual de apenas 30,5%), indicando a existência de uma elevada degradação no material. A extensão na força máxima também sofreu uma grande diminuição após a imersão do geotêxtil B0-500 no meio ácido VI (de 75,0% para 21,5%). O geotêxtil B0-500 possuía uma robustez residual de apenas 7,1% depois da imersão no meio ácido VI. A rigidez secante do material não sofreu alterações muito significativas após os 28 dias de imersão em ácido nítrico 0,5 mol.L<sup>-1</sup>.

A imersão numa mistura de ácido nítrico com ácido sulfúrico (meio ácido VII) também provocou uma elevada degradação no geotêxtil B0-500. Os danos provocados pela imersão durante 14 dias no meio ácido VII foram superiores aos danos provocados pela imersão durante 28 dias em ácido sulfúrico (meio ácido V) ou em ácido nítrico (meio ácido VI).

A imersão no meio ácido VII provocou uma elevada diminuição da resistência à tracção (resistência residual de apenas 27,2%) e da robustez (robustez residual de 5,8%) do geotêxtil B0-500. A extensão na força máxima também sofreu uma grande diminuição (de 75,0% para 18,5%). A rigidez secante (a 2%, 5% e 10%) sofreu um aumento após a imersão do geotêxtil B0-500 no meio ácido VII.

O ácido nítrico provocou danos no banho termostático, o que impossibilitou a utilização deste ácido para a realização de outros ensaios de imersão. Assim, não foi possível expor o geotêxtil B0-500 em ácido nítrico (individualmente ou misturado com ácido sulfúrico) durante intervalos de tempo mais elevados, nem expor outros materiais (tal como o geotêxtil B4-500) à acção deste ácido.

As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido a 90 °C, encontram-se representadas na Figura 6.6.

A análise dos geotêxteis por MEV após os vários ensaios de imersão em meio ácido não mostrou a ocorrência de alterações significativas nos materiais. Mesmo após as imersões nos meios ácidos VI e VII não foram observados danos evidentes nas fibras do geotêxtil B0-500.

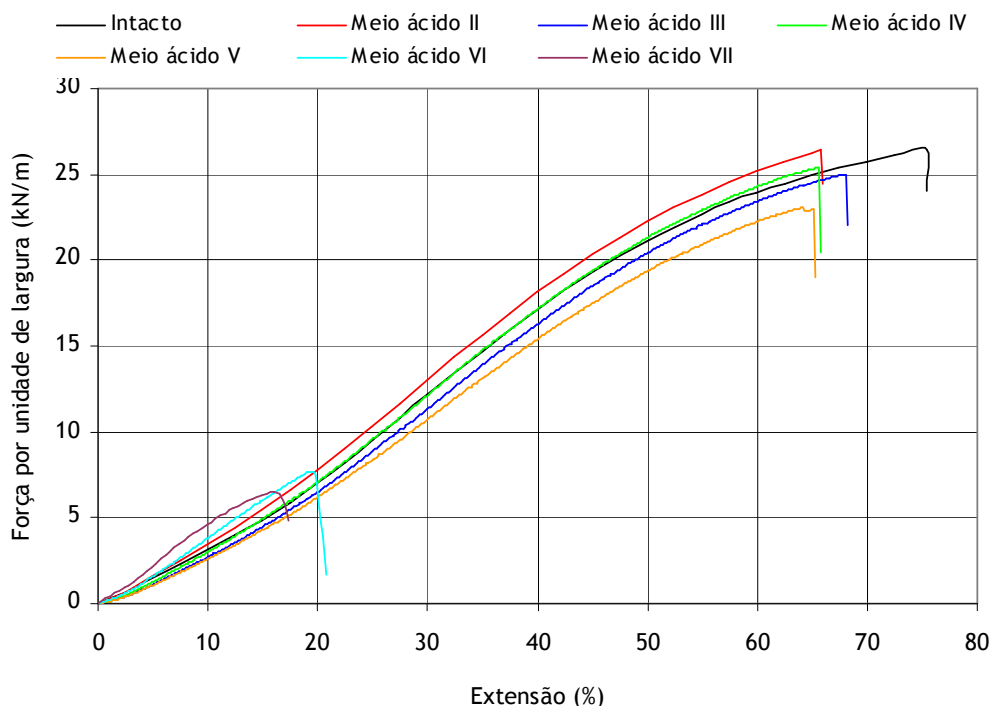


Figura 6.6 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

### 6.3.2.2 - Resistência em meio ácido - geotêxtil B4-500

O Quadro 6.19 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão, a 90 °C, em meio ácido (as condições experimentais destes ensaios estão descritas no ponto 6.2.3). Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 6.20. A Figura 6.7 ilustra as curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão em meio ácido.

Quadro 6.19 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido II     | 28,9 (10%)                                   | 74,8 (3,6%)                  | <b>105</b>               |
| Meio ácido IV     | 26,9 (8,3%)                                  | 71,8 (5,2%)                  | <b>97,5</b>              |
| Meio ácido V      | 26,0 (14%)                                   | 73,0 (8,7%)                  | <b>94,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção e a robustez do geotêxtil B4-500 não sofreram grandes alterações após a imersão em ácido sulfúrico  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio ácido II). O aumento do tempo de imersão para 28 dias (meio ácido IV) provocou uma diminuição da robustez (robustez residual de 82,0%). A resistência à tracção do geotêxtil B4-500 foi pouco alterada pela exposição ao meio ácido IV (resistência residual de 97,5%).

Quadro 6.20 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 33,3                                      | 36,1                                      | 36,9                                       | 40,3                                       | 1188                           | ---                   |
| Meio ácido II     | 29,2                                      | 36,0                                      | 39,9                                       | 43,8                                       | 1250                           | <b>105</b>            |
| Meio ácido IV     | 24,4                                      | 30,1                                      | 32,6                                       | 37,6                                       | 974                            | <b>82,0</b>           |
| Meio ácido V      | 16,0                                      | 23,5                                      | 28,2                                       | 33,7                                       | 925                            | <b>77,9</b>           |

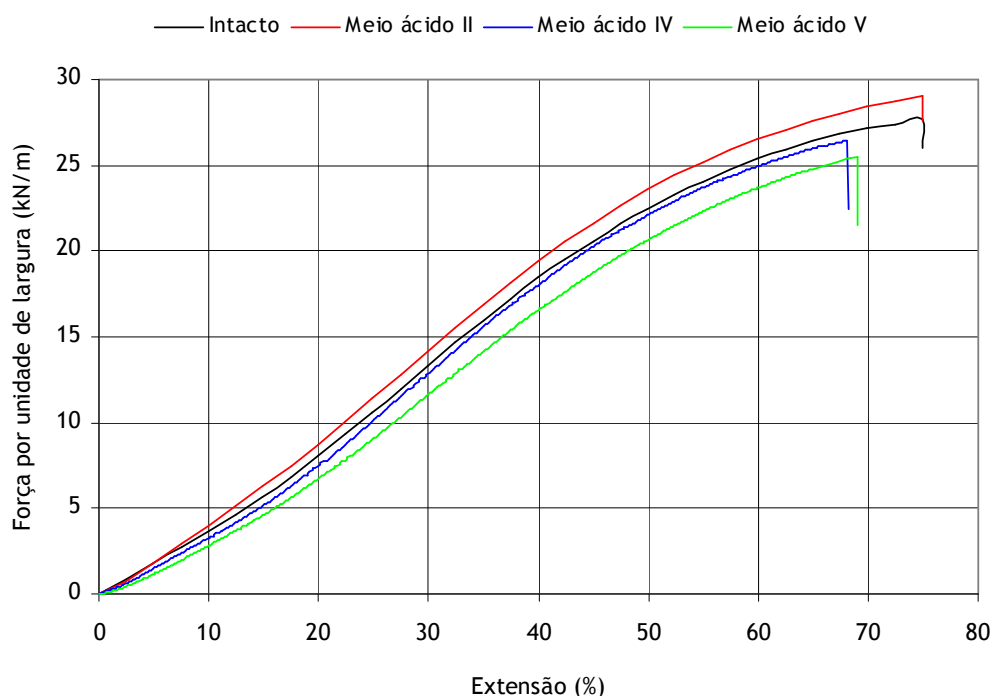


Figura 6.7 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio ácido, a 90 °C.

A imersão, durante 28 dias, numa solução 0,5 mol.L<sup>-1</sup> de ácido sulfúrico (meio ácido V) causou uma pequena diminuição (pouco significativa) da resistência à tracção do geotêxtil B4-500 (resistência residual de 94,2%); o geotêxtil B4-500 apresentava uma robustez residual de 77,9% após a imersão no meio ácido V. Depois do mesmo ensaio de imersão, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência residual de 93,5% e uma robustez residual de 69,1%. Dada a proximidade dos valores obtidos para os dois geotêxteis, não é possível concluir qual o efeito do C944, se algum, na resistência dos materiais à acção dos ácidos.

A imersão do geotêxtil B4-500 nos meios ácidos VI e VII poderia ter elucidado se a presença do C944 tem algum contributo, ou não, para o aumento da resistência dos materiais aos ácidos. No entanto, e pelo motivo já anteriormente apresentado, não foi possível realizar esses ensaios de imersão.

A extensão na força máxima do geotêxtil B4-500 não sofreu alterações significativas após a imersão nos meios ácidos II, IV e V. A análise do geotêxtil B4-500 por MEV mostrou a inexistência de danos microscópicos no material.

**6.3.2.3 - Resistência em meio alcalino - geotêxtil B0-500**

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, encontram-se resumidas nos Quadros 6.21 e 6.22 (as condições experimentais dos ensaios foram descritas no ponto 6.2.3). A Figura 6.8 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão.

Quadro 6.21 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,2 (14%)                                  | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| Meio alcalino II  | 27,3 (3,2%)                                 | 68,8 (3,0%)                  | <b>104</b>               |
| Meio alcalino III | 27,5 (7,8%)                                 | 70,3 (8,4%)                  | <b>105</b>               |
| Meio alcalino IV  | 23,0 (11%)                                  | 57,9 (7,9%)                  | <b>87,8</b>              |
| Meio alcalino V   | 19,4 (14%)                                  | 44,5 (4,0%)                  | <b>74,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.22 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 27,0                                      | 30,2                                      | 31,3                                       | 35,3                                       | 1117                           | ---                   |
| Meio alcalino II  | 25,3                                      | 32,8                                      | 37,3                                       | 41,9                                       | 1006                           | <b>90,1</b>           |
| Meio alcalino III | 23,0                                      | 29,9                                      | 34,3                                       | 39,5                                       | 1006                           | <b>90,1</b>           |
| Meio alcalino IV  | 50,4                                      | 41,8                                      | 39,4                                       | 40,7                                       | 601                            | <b>53,8</b>           |
| Meio alcalino V   | 64,2                                      | 50,8                                      | 46,2                                       | 45,6                                       | 423                            | <b>37,9</b>           |

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 não sofreu alterações muito significativas após 7 e 14 dias de imersão, a 90 °C, numa solução 0,1 mol.L<sup>-1</sup> de hidróxido de sódio (meios alcalinos II e III). O aumento do tempo de imersão para 28 dias (meio alcalino IV) causou uma diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistência residual de 87,8 %). A imersão numa solução 0,5 mol.L<sup>-1</sup> de hidróxido de sódio (meio alcalino V) provocou uma diminuição adicional da resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistência residual de 74,0%).

A extensão na força máxima do geotêxtil B0-500 não sofreu grandes alterações depois das imersões nos meios alcalinos II e III. Por sua vez, a imersão no meio alcalino IV causou uma grande diminuição da extensão na força máxima do geotêxtil B0-500 (diminuição de 75,0% para 57,9%). O aumento da concentração do hidróxido de sódio de 0,1 mol.L<sup>-1</sup> para 0,5 mol.L<sup>-1</sup> (meio alcalino V) provocou uma redução ainda mais acentuada da extensão na força máxima do geotêxtil B0-500 (redução de 75,0% para 44,5%).

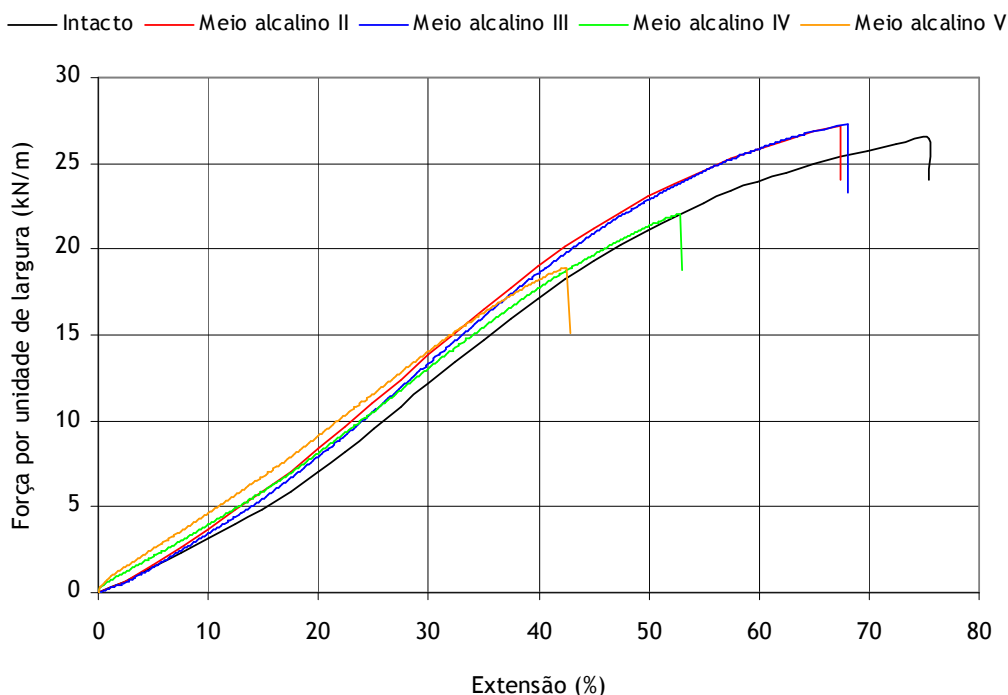


Figura 6.8 - Curvas médias força-estensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

Os valores da rigidez secante do geotêxtil B0-500 (para qualquer extensão especificada) sofreram um aumento após as imersões nos meios alcalinos IV e V. A robustez do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição depois das imersões nos meios alcalinos II e III (robustez residual de 90,1% após ambos os ensaios). O aumento do tempo de imersão de 14 dias para 28 dias (meio alcalino IV) numa solução de  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  de hidróxido de sódio provocou uma diminuição acentuada na robustez do geotêxtil B0-500 (robustez residual de 53,8%); a imersão em hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio alcalino V) causou uma diminuição ainda maior da robustez do geotêxtil B0-500 (robustez residual de 37,9%).

A imersão durante 28 dias em hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio alcalino IV) provocou mais danos ao geotêxtil B0-500 que a imersão em ácido sulfúrico  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio ácido IV). De facto, depois da imersão no meio ácido IV, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência residual de 100% (87,8% após a imersão no meio alcalino IV), uma robustez residual de 77,9% (53,8% após a imersão no meio alcalino IV) e uma extensão na força máxima muito semelhante ao seu valor de referência (redução de 75,0% para 57,9% após a imersão no meio alcalino IV).

Do mesmo modo, a imersão em hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio alcalino V) também causou mais danos que a imersão em ácido sulfúrico  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio ácido V). Depois da imersão no meio ácido V, o geotêxtil B0-500 apresentava uma resistência residual de 93,5% (74,0% após imersão no meio alcalino V), uma robustez residual de 69,1% (37,9% após imersão no meio alcalino V) e uma extensão na força máxima de 73,6% (44,5% após imersão no meio alcalino V).

Os danos provocados pela imersão durante 28 dias em ácido nítrico  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio ácido VI) foram superiores aos danos provocados pela imersão em hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  (meio alcalino V).

De facto, depois da imersão no meio ácido VI, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência residual de 30,5%, uma robustez residual de 7,1% e uma extensão na força máxima de 21,5%.

Assim, em condições experimentais semelhantes (de temperatura, de tempo e de concentração), os danos causados pela imersão em hidróxido de sódio foram superiores aos danos resultantes da imersão em ácido sulfúrico, mas inferiores aos danos provocados pela imersão em ácido nítrico.

A análise do geotêxtil B0-500 por MEV após os vários ensaios de imersão em meio alcalino mostrou a inexistência de danos significativos no material (Figura 6.9). No entanto, foram observadas algumas partículas sobre as fibras do geotêxtil B0-500 que poderiam indicar a ocorrência de degradação no material (partículas não encontradas depois das várias imersões em meio ácido). A análise por raio X (da zona assinalada a verde na Figura 6.9c) indicou a presença de sódio e de oxigénio na composição dessas partículas (Figura 6.10a), sendo por isso, muito provavelmente, cristais de hidróxido de sódio que ficaram depositados por cima das fibras dos materiais; a análise por raio X mostrou também a presença de carbono, mas tal deve-se à contribuição de fundo das fibras de PP. A análise da zona imediatamente ao lado das partículas (zona assinalada a vermelho na Figura 6.9c) não revelou a presença de outros elementos para além do carbono existente nas fibras de PP (Figura 6.10b).

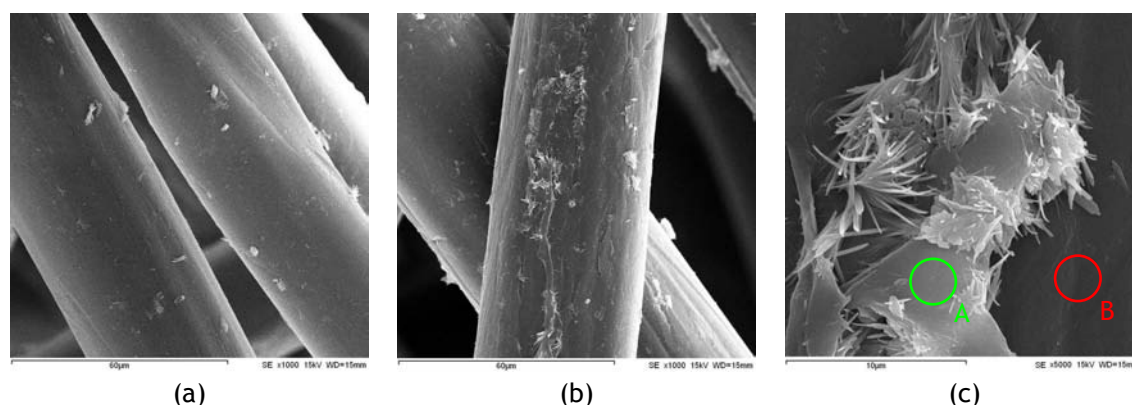


Figura 6.9 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após a imersão no meio alcalino V: (a) x1000; (b) x1000; (c) x5000.

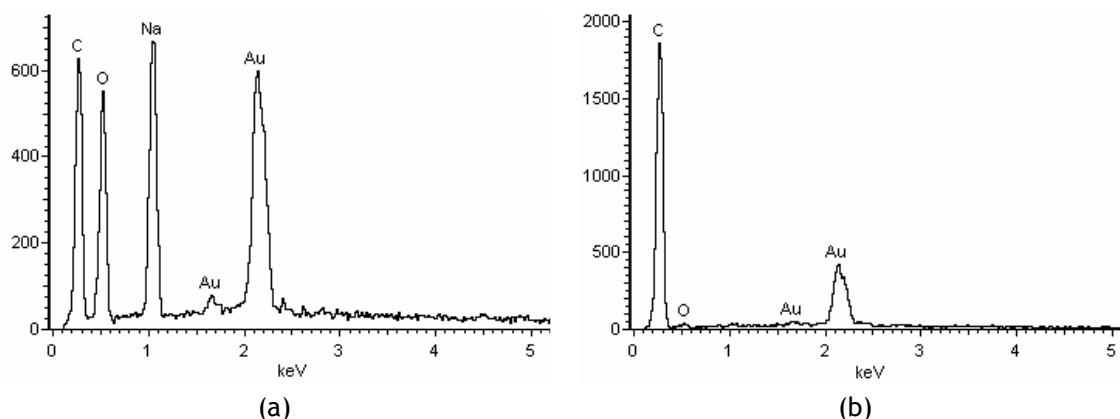


Figura 6.10 - Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após a imersão no meio alcalino V: (a) zona A (a verde) da Figura 6.9c; (b) zona B (a vermelho) da Figura 6.9c.



### 6.3.2.4 - Resistência em meio alcalino - geotêxtil B4-500

A resistência à tracção, a extensão na força máxima e a resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão em meio alcalino (as condições experimentais dos ensaios foram descritas no ponto 6.2.3), encontram-se resumidas no Quadro 6.23. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser observados no Quadro 6.24. A Figura 6.11 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes ensaios de imersão em meio alcalino.

Quadro 6.23 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| Meio alcalino II  | 28,8 (4,2%)                                  | 65,6 (5,3%)                  | <b>104</b>               |
| Meio alcalino V   | 25,9 (19%)                                   | 67,3 (6,8%)                  | <b>93,8</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.24 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| Meio alcalino II  | 35,8  | 43,0  | 46,7   | 50,2   | 980                             | <b>82,5</b>           |
| Meio alcalino V   | 30,8  | 32,6  | 34,1   | 37,7   | 765                             | <b>64,4</b>           |

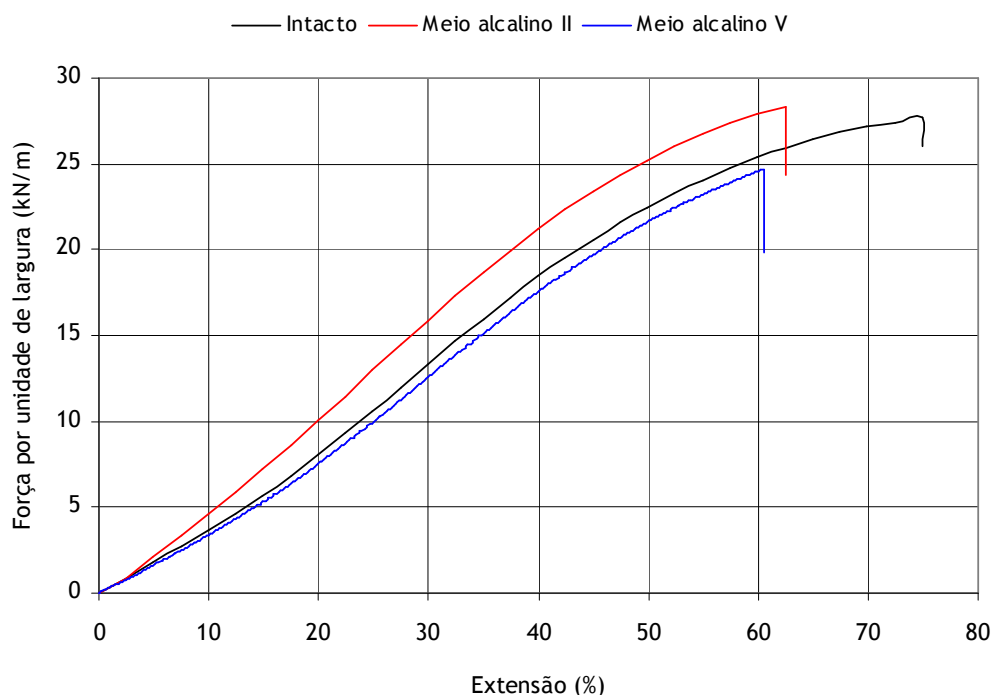


Figura 6.11 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão em meio alcalino, a 90 °C.

A resistência à tracção manteve-se praticamente inalterada após 7 dias de imersão, a 90 °C, numa solução 0,1 mol.L<sup>-1</sup> de hidróxido de sódio (meio alcalino II), enquanto que extensão na força máxima sofreu uma ligeira diminuição (de 74,1% para 65,6%). A robustez do geotêxtil B4-500 diminuiu depois da imersão no meio alcalino II (robustez residual de 82,5%). Os valores da rigidez secante (para qualquer extensão especificada) do geotêxtil B4-500 sofreram um pequeno aumento após a imersão no meio alcalino II.

A imersão durante 28 dias em hidróxido de sódio 0,5 mol.L<sup>-1</sup> (meio alcalino V) causou uma pequena diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B4-500 (resistência residual de 93,8%). A extensão na força máxima também sofreu uma pequena diminuição (de 74,1% para 67,3%). A rigidez secante do geotêxtil B4-500 não sofreu grandes alterações, enquanto que a robustez diminuiu após imersão no meio alcalino V (robustez residual de 64,4%).

As resistências residuais do geotêxtil B4-500 foram muito semelhantes depois das imersões no meio ácido V e no meio alcalino V (94,2% e 93,8%, respectivamente). No entanto, a robustez do geotêxtil B4-500 foi superior após a imersão no meio ácido V (robustez residual de 77,9% contra uma robustez residual de 64,4% depois da imersão no meio alcalino V).

Os danos sofridos pelo geotêxtil B0-500 após imersão no meio alcalino V foram superiores aos danos sofridos pelo geotêxtil B4-500. De facto, depois da imersão no meio alcalino V, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência residual de 74,0% (93,8% para o geotêxtil B4-500), uma robustez residual de 37,9% (64,4% para o geotêxtil B4-500) e uma extensão na força máxima de 44,5% (67,3% para o geotêxtil B4-500). Assim, estes resultados indicam que a presença do C944 pode contribuir para um ligeiro aumento da resistência dos geotêxteis de PP à acção do hidróxido de sódio.

A análise do geotêxtil B4-500 por MEV após os vários ensaios de imersão em meio alcalino mostrou a inexistência de danos no material. Tal como foi observado para o geotêxtil B0-500, também foram encontradas algumas partículas sobre as fibras do geotêxtil B4-500 (muito provavelmente cristais de hidróxido de sódio).

### **6.3.3 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente**

#### **6.3.3.1 - Geotêxtil B0-500**

O Quadro 6.25 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente (as condições experimentais destes ensaios foram descritas no ponto 6.2.4). Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 6.26. A Figura 6.12 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B0-500.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 não sofreu grandes alterações após as várias imersões à temperatura ambiente durante 1 ano (resistências residuais entre os 96,2% e os 98,5%). A extensão na força máxima do geotêxtil B0-500 sofreu algumas variações sem grande significado.

Quadro 6.25 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,2 (14%)                                   | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido VIII   | 25,8 (16%)                                   | 83,3 (17%)                   | <b>98,5</b>              |
| Meio alcalino VI  | 25,2 (9,4%)                                  | 81,5 (15%)                   | <b>96,2</b>              |
| Hidrólise II      | 25,7 (6,2%)                                  | 73,3 (5,1%)                  | <b>98,1</b>              |
| Cloreto de sódio  | 25,4 (13%)                                   | 78,4 (8,0%)                  | <b>97,0</b>              |
| Nitrato de ferro  | 25,7 (6,9%)                                  | 80,5 (12%)                   | <b>98,1</b>              |
| Lixiviado         | 25,4 (17%)                                   | 72,3 (6,3%)                  | <b>97,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.26 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 27,0  | 30,2  | 31,3   | 35,3   | 1117                            | ---                   |
| Meio ácido VIII   | 20,0  | 26,0  | 29,2   | 34,5   | 971                             | <b>86,9</b>           |
| Meio alcalino VI  | 33,7  | 31,0  | 30,4   | 32,7   | 860                             | <b>77,0</b>           |
| Hidrólise II      | 20,9  | 27,9  | 31,9   | 37,3   | 989                             | <b>88,5</b>           |
| Cloreto de sódio  | 22,0  | 27,6  | 30,8   | 35,2   | 954                             | <b>85,4</b>           |
| Nitrato de ferro  | 19,9  | 23,5  | 26,4   | 30,7   | 815                             | <b>73,0</b>           |
| Lixiviado         | 26,2  | 30,7  | 33,6   | 38,5   | 936                             | <b>83,8</b>           |

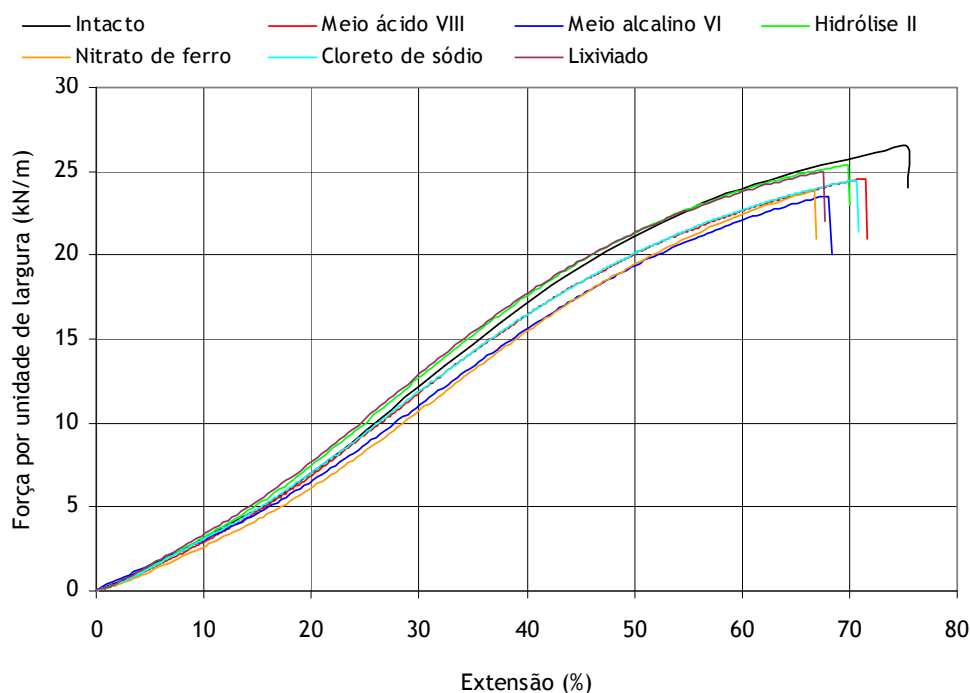


Figura 6.12 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

A robustez do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição depois de todas as imersões à temperatura ambiente (valores de robustez residual entre os 73,0% e os 88,5%). Por sua vez, os valores da rigidez secante do geotêxtil B0-500 apresentaram ligeiras variações (sem nenhuma tendência evidente) que poderão ser apenas devidas à heterogeneidade característica do material.

Em análise global, o geotêxtil B0-500 apresentou uma boa resistência aos vários ensaios de imersão realizados à temperatura ambiente. De destacar que, a imersão durante 1 ano num lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos não causou uma diminuição muito significativa da resistência do material.

### 6.3.3.2 - Geotêxtil B4-500

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de imersão à temperatura ambiente, encontram-se resumidas nos Quadros 6.27 e 6.28 (as condições experimentais dos ensaios estão descritas no ponto 6.2.4). A Figura 6.13 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os vários ensaios de imersão.

Quadro 6.27 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 27,6 (6,1%)                                 | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| Meio ácido VIII   | 28,2 (13%)                                  | 73,0 (9,0%)                  | 102                      |
| Meio alcalino VI  | 26,7 (5,9%)                                 | 69,1 (4,9%)                  | 96,7                     |
| Hidrólise II      | 28,0 (7,7%)                                 | 83,8 (3,3%)                  | 101                      |
| Cloreto de sódio  | 27,4 (5,2%)                                 | 77,2 (11%)                   | 99,3                     |
| Nitrato de ferro  | 27,3 (9,2%)                                 | 75,8 (4,9%)                  | 98,9                     |
| Lixiviado         | 27,1 (9,8%)                                 | 72,0 (5,1%)                  | 98,2                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 6.28 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 33,3                                      | 36,1                                      | 36,9                                       | 40,3                                       | 1188                           | ---                   |
| Meio ácido VIII   | 30,0                                      | 38,1                                      | 41,3                                       | 45,6                                       | 1122                           | 94,4                  |
| Meio alcalino VI  | 49,2                                      | 47,3                                      | 45,5                                       | 47,2                                       | 969                            | 81,6                  |
| Hidrólise II      | 24,7                                      | 32,1                                      | 35,7                                       | 40,2                                       | 1380                           | 116                   |
| Cloreto de sódio  | 24,2                                      | 30,5                                      | 33,6                                       | 38,9                                       | 1087                           | 91,5                  |
| Nitrato de ferro  | 38,1                                      | 41,4                                      | 42,3                                       | 45,7                                       | 1136                           | 95,6                  |
| Lixiviado         | 43,2                                      | 44,7                                      | 45,0                                       | 47,7                                       | 1144                           | 96,3                  |

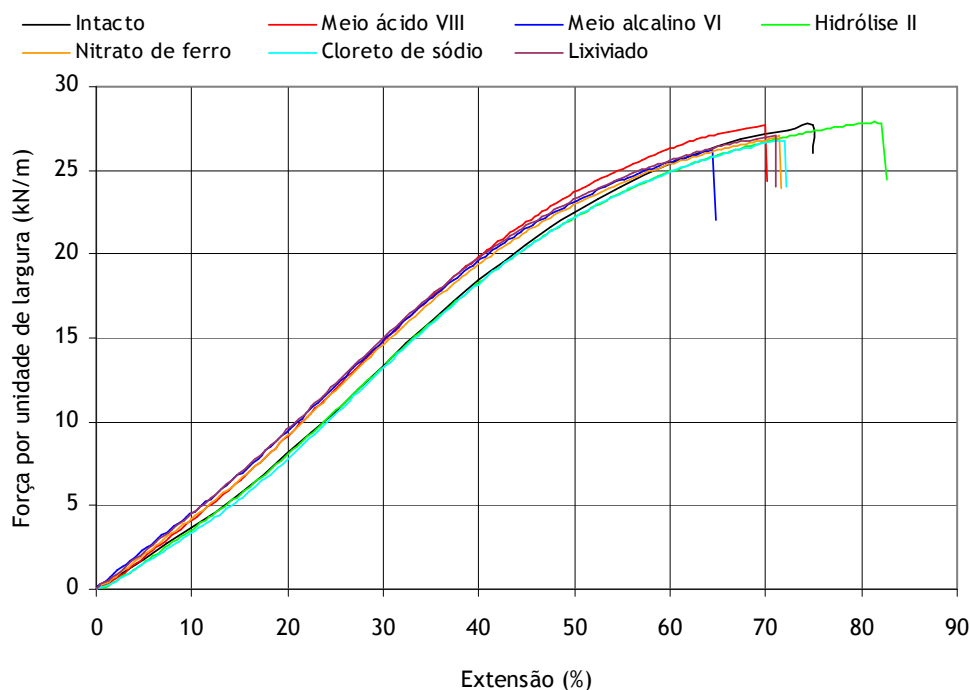


Figura 6.13 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

A resistência à tracção do geotêxtil B4-500 não sofreu alterações muito significativas depois dos vários ensaios de imersão à temperatura ambiente (resistências residuais entre os 96,7% e os 102%); a extensão na força máxima do geotêxtil B4-500 sofreu algumas variações sem grande significado. Os valores de rigidez secante do geotêxtil B4-500 apresentaram algumas variações, que poderão ser apenas devidas à heterogeneidade do material. De um modo geral, a robustez do geotêxtil B4-500 diminuiu após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente (a única excepção foi depois do ensaio de hidrólise II). Tal como o geotêxtil B0-500, o geotêxtil B4-500 também não sofreu grandes danos durante os vários ensaios de imersão realizados à temperatura ambiente.

#### 6.4 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se à avaliação da resistência dos geotêxteis à imersão em várias soluções químicas, a diferentes temperaturas (à temperatura ambiente, a 60 °C e a 90 °C) e durante diversos períodos de tempo. De um modo geral, e com a excepção dos ensaios de imersão em ácido nítrico (meios ácidos VI e VII), os geotêxteis não possuíam grandes danos após os vários ensaios de imersão; deste modo, os geotêxteis apresentaram uma boa resistência contra a degradação provocada pela imersão em soluções químicas.

A imersão em soluções químicas pode provocar a extracção e/ou o consumo dos aditivos existentes nos geotêxteis, desprotegendo os materiais contra futuros agentes de degradação. Assim, e apesar de não terem causado danos imediatos nos geotêxteis, os ensaios de imersão podem eventualmente contribuir para a ocorrência de danos a longo prazo nos materiais. O efeito da imersão em líquidos na resistência dos geotêxteis à termo-oxidação e aos agentes climáticos simulados em laboratório será avaliado no Capítulo 7 e no Capítulo 9, respectivamente.



# CAPÍTULO 7

## Determinação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação

### - Método do forno -

#### 7.1 - Introdução

A oxidação é uma das principais causas de degradação de vários polímeros, incluindo aqueles usados no fabrico de geossintéticos. A baixas temperaturas (e na ausência de radiação UV) o processo de oxidação é normalmente lento. No entanto, este tipo de degradação não pode ser desprezado em materiais poliméricos aplicados em obras de Engenharia Civil (onde os materiais normalmente terão de desempenhar as suas funções durante várias dezenas de anos). Deste modo, é importante avaliar a resistência dos geossintéticos à oxidação induzida pela temperatura.

A resistência dos geossintéticos à termo-oxidação pode ser determinada com base em resultados experimentais obtidos sob condições de degradação aceleradas (quer através do aumento da temperatura, quer através do aumento da concentração de oxigénio). Assim, os métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação utilizam normalmente temperaturas elevadas e atmosferas que podem, ou não, ser enriquecidas com oxigénio. A aceleração do processo de oxidação é indispensável para se obterem resultados num intervalo de tempo relativamente curto.

Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação através do método do forno. Neste método, os materiais são expostos a temperaturas elevadas num forno com uma atmosfera normal de oxigénio. Após os ensaios, as propriedades dos provetes expostos foram comparadas com as propriedades dos provetes de referência.

A exposição dos geotêxteis a diferentes temperaturas permitiu avaliar o efeito da temperatura na velocidade de degradação dos materiais. Os resultados experimentais da degradação dos geotêxteis a temperaturas elevadas foram utilizados para estimar a velocidade de degradação dos materiais a temperaturas consideravelmente mais baixas.

A resistência dos geotêxteis à termo-oxidação foi também avaliada após uma imersão prévia dos materiais em ácidos (ácido sulfúrico e ácido nítrico), em bases (hidróxido de sódio), em água e em soluções de cations metálicos (cádmio, cobre, ferro e zinco). Assim, foi possível avaliar o efeito das várias imersões na resistência dos geotêxteis à termo-oxidação.

## 7.2 - Descrição geral do ensaio de termo-oxidação

Os geotêxteis foram expostos a temperaturas elevadas, durante diferentes períodos de tempo, num forno (marca *Heraeus Instruments*, modelo *T6120*) (Figura 7.1) com atmosfera normal de oxigénio (21% de  $O_2$ ), sem circulação forçada de ar (a circulação de ar ocorreu naturalmente por uma válvula de entrada de ar existente no forno, que foi mantida completamente aberta durante os ensaios). As principais características do forno utilizado encontram-se no Quadro 7.1.



Figura 7.1 - Equipamento utilizado para expor os geotêxteis ao ensaio de termo-oxidação: (a) vista exterior: forno fechado; (b) vista interior: geotêxteis no interior do forno.

Quadro 7.1 - Principais características do forno utilizado nos ensaios de termo-oxidação.

|  |   |
|--|---|
| Dimensões interiores                                     | 554 mm x 524 mm x 370 mm<br>(comprimento, altura, largura)  |
| Volume   | 107 L   |
| Renovação de ar máxima<br>(válvula de ventilação aberta) | 2,86 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> (a 150 °C)<br>2,60 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> (a 70 °C) |
| Flutuação de temperatura                                 | Menor ou igual a 0,5 °C   |

Os provetes foram colocados no interior do forno (pendurados em suportes de aço inoxidável) com algum espaço livre entre si (de modo a permitir uma boa circulação do ar e evitar o contacto entre os diferentes provetes). Os provetes expostos (pelo menos 6 provetes) possuíam 200 mm de largura e 300 mm de comprimento (de modo a terem dimensões compatíveis com as dimensões necessárias para os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319).

Após a exposição, os provetes foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz por um período mínimo de 24 horas. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319 (este método de ensaio encontra-se descrito no ponto 4.5). A existência de alterações microscópicas nos geotêxteis foi avaliada por MEV.

As características particulares de cada um dos ensaios de termo-oxidação realizados serão descritas mais à frente, antes da apresentação e discussão dos principais resultados obtidos.



### 7.3 - Resultados experimentais

#### 7.3.1 - Avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação

##### 7.3.1.1 - Considerações iniciais

Para a avaliação da resistência à termo-oxidação, os geotêxteis não estabilizados (B0-280 e B0-500) foram expostos à temperatura de 110 °C durante um período máximo de 14 dias. Por sua vez, os geotêxteis estabilizados (B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500) foram expostos à mesma temperatura durante 14, 28, 42 e 56 dias. A existência de encolhimento dos geotêxteis foi avaliada através da exposição dos materiais durante 6 horas a 110 °C (provetes de controlo).

Os ensaios de termo-oxidação realizados englobam os ensaios descritos na norma NP EN ISO 13438: 2006 (Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência à oxidação). Segundo esta norma, os geotêxteis de PP deverão ser expostos a 110 °C durante 14 dias (para todas as aplicações, excepto a de reforço) ou durante 28 dias (para aplicações de reforço).

##### 7.3.1.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500

Os geotêxteis B0-280 e B0-500 não apresentaram sinais visíveis de degradação durante os primeiros 7 dias de exposição a 110 °C. Ao 8.º dia de exposição, começaram a ser perceptíveis odores intensos a “plástico queimado”, indicando a ocorrência de degradação na estrutura polimérica dos materiais. Após 9 dias a 110 °C, os geotêxteis sem C944 possuíam uma cor amarelada (originalmente eram brancos) e libertavam pequenos pedaços de fibras quebradas. Ao 11.º dia de exposição, os materiais estavam completamente amarelos e podiam ser facilmente transformados em pequenos pedaços ou mesmo em pó (Figura 7.2).

A exposição dos geotêxteis B0-280 e B0-500 a 110 °C provocou uma grande degradação dos materiais num intervalo de tempo relativamente pequeno. De facto, após 11 dias de exposição, os geotêxteis B0-280 e B0-500 estavam muito perto da desintegração completa. A massa e as dimensões (largura e comprimento) dos materiais foram monitorizadas durante o ensaio de termo-oxidação (Quadro 7.2 e Quadro 7.3).

Quadro 7.2 - Variação da massa e das dimensões do geotêxtil B0-280 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

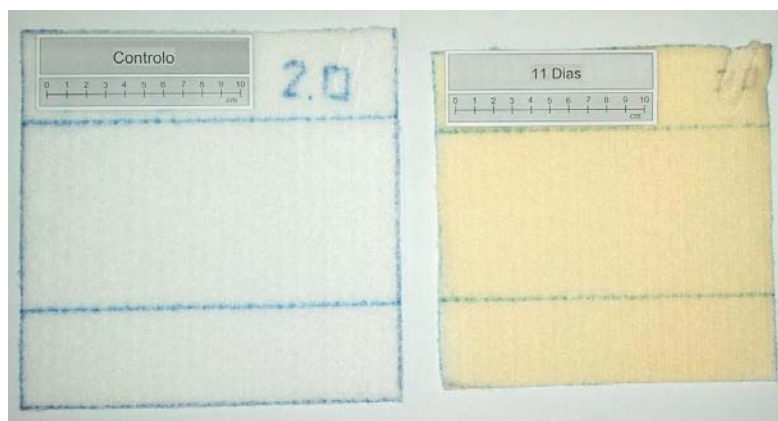
| Tempo   | Variação de massa (%) | Variação das dimensões (%) |
|---------|-----------------------|----------------------------|
| 6 Horas | 0                     | - 2,0                      |
| 4 Dias  | 0                     | - 3,1                      |
| 7 Dias  | - 0,4                 | - 3,4                      |
| 9 Dias  | - 3,0                 | - 9,7                      |
| 11 Dias | - 5,6                 | - 11,8                     |
| 14 Dias | - 6,0                 | - 12,6                     |

(valores médios de 6 provetes)

Quadro 7.3 - Variação da massa e das dimensões do geotêxtil B0-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Variação de massa (%) | Variação das dimensões (%) |
|---------|-----------------------|----------------------------|
| 6 Horas | 0                     | - 2,5                      |
| 7 Dias  | - 0,2                 | - 2,6                      |
| 9 Dias  | - 0,3                 | - 5,8                      |
| 11 Dias | - 4,4                 | - 10,4                     |
| 14 Dias | - 5,4                 | - 11,2                     |

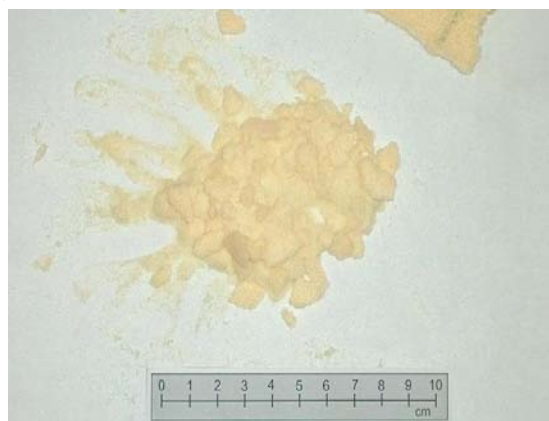
(valores médios de 6 provetes)



(a)



(b)



(c)

Figura 7.2 - Aspecto dos geotêxteis sem C944 após 11 dias de termo-oxidação a 110 °C:

(a) comparação com provete de controlo; (b) pequenos pedaços; (c) materiais transformados em pó.

As dimensões dos provetes de controlo (expostos durante 6 horas) sofreram uma ligeira diminuição após exposição a 110 °C (encolhimento de 2,0% para o geotêxtil B0-280 e encolhimento de 2,5% para o geotêxtil B0-500); a ocorrência de um pequeno encolhimento durante a exposição de geotêxteis ao ensaio de termo-oxidação é relativamente comum. A massa dos provetes de controlo não sofreu qualquer alteração depois da exposição a 110 °C durante 6 horas.

O processo de degradação dos geotêxteis B0-280 e B0-500 foi acompanhado por uma perda de massa dos materiais (após 14 dias, 6,0% para o geotêxtil B0-280 e 5,4% para o geotêxtil B0-500) e de uma redução nas suas dimensões (após 14 dias, encolhimento de 12,6% para o geotêxtil B0-280 e 11,2% para o geotêxtil B0-500).

A exposição dos geotêxteis B0-280 e B0-500 à termo-oxidação a 110 °C provocou danos avultados na estrutura dos materiais, afectando seriamente as suas propriedades mecânicas. Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após a exposição a 110 °C, encontram-se resumidos no Quadro 7.4. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser observados no Quadro 7.5. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, obtidas antes e após o ensaio de termo-oxidação a 110 °C, estão ilustradas na Figura 7.3.

O Quadro 7.6 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 7.7. A Figura 7.4 ilustra as curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, obtidas antes e após a exposição aos ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

Quadro 7.4 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 13,8 (17%)                                  | 100 (6,3%)                   | <b>100</b>               |
| 4 Dias  | 13,6 (8,8%)                                 | 97,2 (10%)                   | <b>98,6</b>              |
| 7 Dias  | 10,7 (12%)                                  | 91,6 (15%)                   | <b>77,5</b>              |
| 9 Dias  | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.5 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| 6 Horas | 6,0                                       | 10,6                                      | 14,0                                       | 16,5                                       | 960                            | <b>91,2</b>           |
| 4 Dias  | 5,9                                       | 10,2                                      | 14,0                                       | 17,0                                       | 690                            | <b>65,5</b>           |
| 7 Dias  | 3,7                                       | 6,8                                       | 9,7  | 11,9                                       | 555                            | <b>52,7</b>           |
| 9 Dias  | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

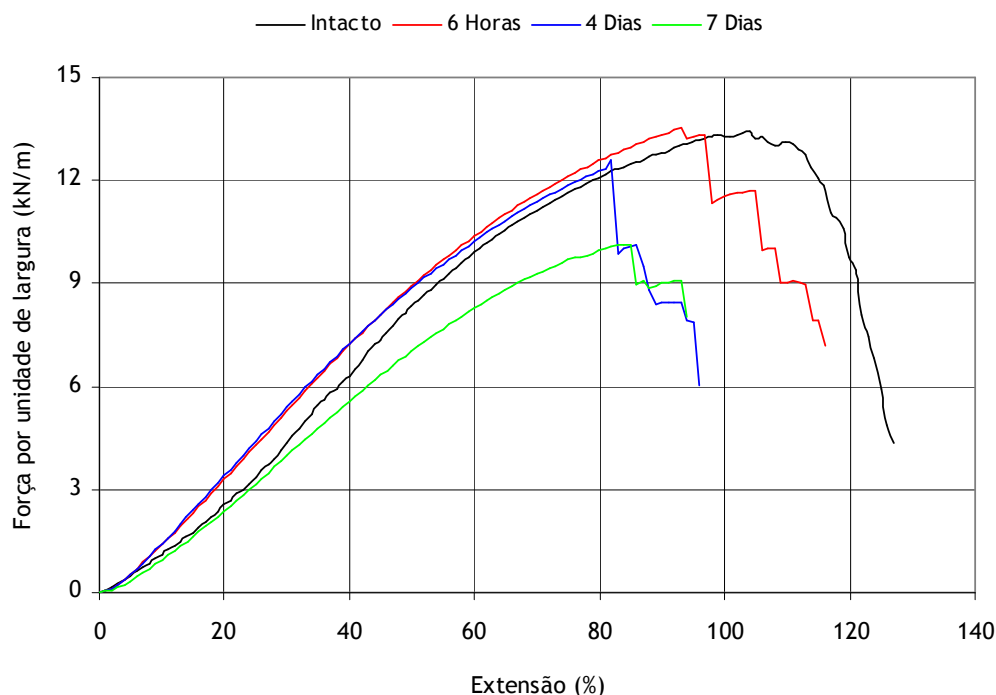


Figura 7.3 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

Quadro 7.6 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 25,6 (11%)                                  | 136 (12%)                    | ---                      |
| 6 Horas | 25,5 (6,5%)                                 | 111 (8,0%)                   | <b>99,6</b>              |
| 7 Dias  | 24,6 (11%)                                  | 97,6 (6,5%)                  | <b>96,1</b>              |
| 9 Dias  | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 13,8                                      | 26,2                                      | 33,6                                       | 36,4                                       | 2382                           | ---                   |
| 6 Horas | 21,6                                      | 30,2                                      | 35,3                                       | 36,9                                       | 2111                           | <b>88,6</b>           |
| 7 Dias  | 26,0                                      | 33,5                                      | 37,5                                       | 38,0                                       | 1571                           | <b>66,0</b>           |
| 9 Dias  | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

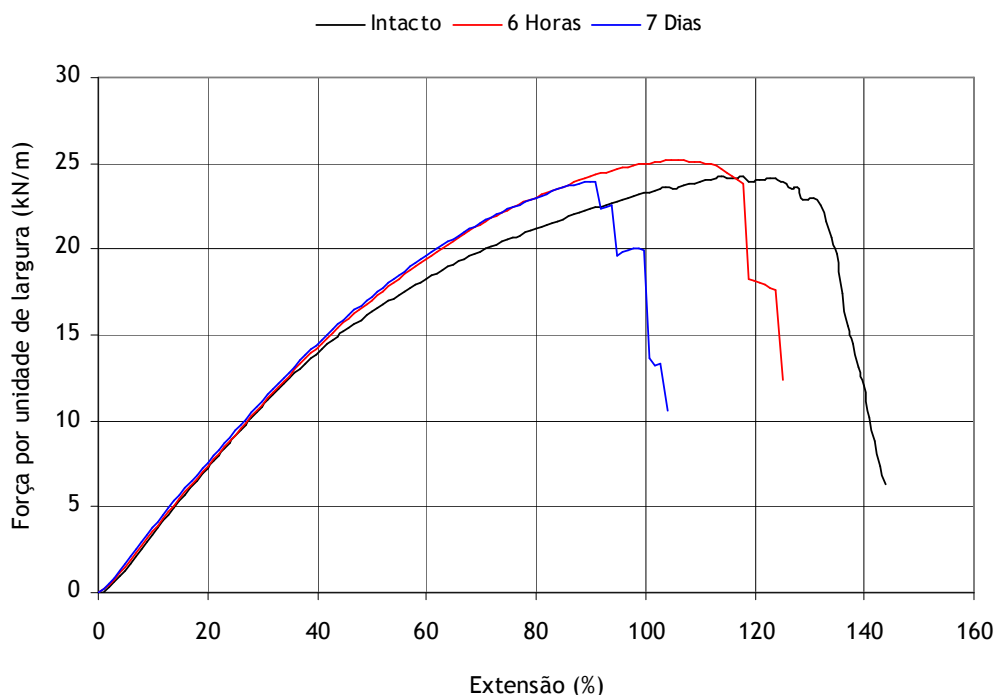


Figura 7.4 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

A resistência à tracção dos provetes de controlo não sofreu alterações depois da exposição a 110 °C durante 6 horas (resistências residuais próximas de 100%), enquanto que as respectivas extensões na força máxima sofreram uma pequena diminuição (de 113% para 100% no geotêxtil B0-280 e de 136% para 111% no geotêxtil B0-500). A robustez dos provetes de controlo também sofreu uma diminuição após as 6 horas de exposição a 110 °C (robustez residual de 91,2% para o geotêxtil B0-280 e de 88,6% para o geotêxtil B0-500).

A resistência à tracção dos geotêxteis B0-280 e B0-500 diminuiu rapidamente durante o ensaio de termo-oxidação a 110 °C. Após 9 dias de exposição, ambos os materiais já possuíam uma resistência à tracção nula, devido à elevada degradação ocorrida nas fibras de PP. A degradação ocorreu muito rapidamente, uma vez que ao fim de 7 dias de exposição os materiais ainda possuíam resistências à tracção bastante elevadas (resistências residuais de 77,5% para o geotêxtil B0-280 e de 96,1% para o geotêxtil B0-500).

A extensão na força máxima também diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 7 dias de exposição, o geotêxtil B0-280 possuía uma extensão na força máxima de 91,6% (extensão original de 113 %), enquanto que o geotêxtil B0-500 apresentava uma extensão na força máxima de 97,6% (extensão original de 136%). A robustez dos geotêxteis B0-280 e B0-500 também sofreu uma redução durante os ensaios de termo-oxidação (ao fim de 7 dias de exposição, robustez residual de 52,7% e de 66,0%, respectivamente).

A degradação sofrida pelos materiais durante os ensaios de termo-oxidação foi caracterizada por MEV. A Figura 7.5 ilustra algumas imagens obtidas para o geotêxtil B0-500 após 14 dias de exposição a 110 °C.

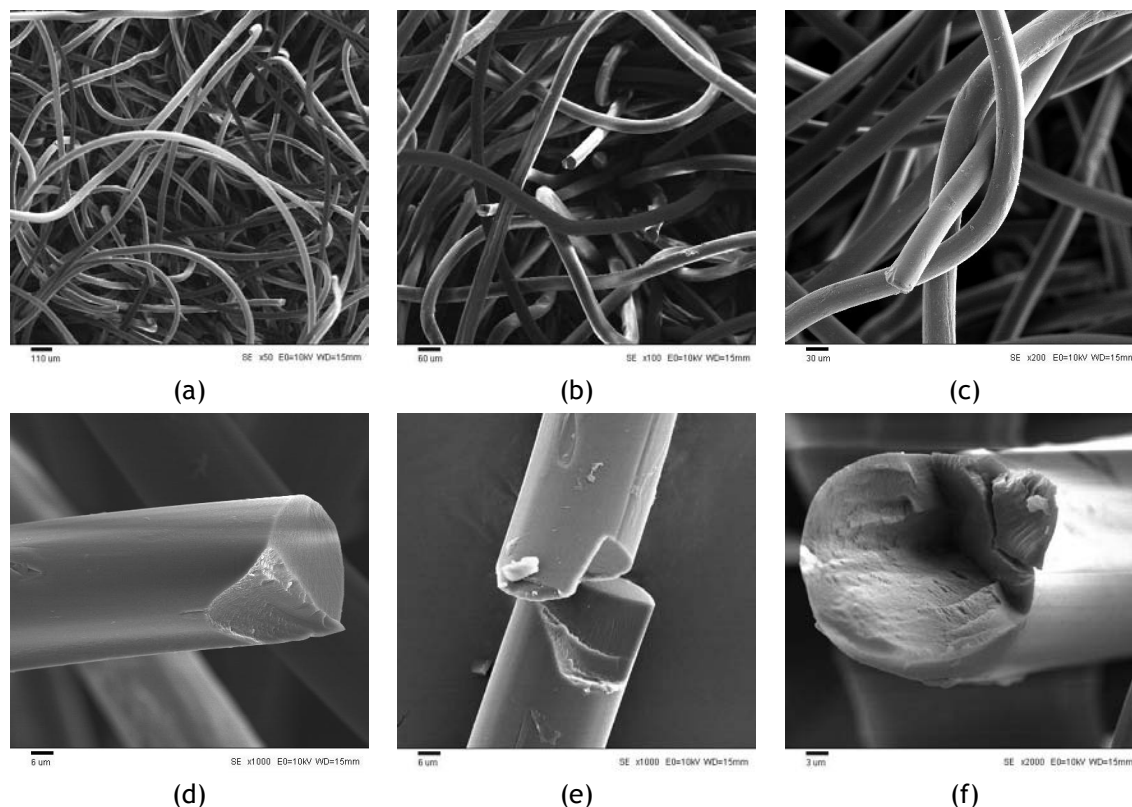


Figura 7.5 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) x50; (b) x100; (c) x200; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

Ao contrário do que seria de esperar, o geotêxtil B0-500 não apresentava, a nível microscópico, muitos sinais de degradação. O geotêxtil B0-500 possuía um aspecto global muito pouco degradado, notando-se apenas a existência de algumas fibras quebradas (Figuras 7.5a, 7.5b e 7.5c). A análise mais pormenorizada dessas fibras quebradas Figuras 7.5d, 7.5e e 7.5f) mostrou que, para além das zonas de fractura, as fibras não apresentavam outros sinais de degradação (tais como rasgos ou fissuras). Apesar do geotêxtil B0-500 poder ser facilmente transformado em pequenos pedaços ou mesmo em pó, não foram encontrados danos microscópicos nas fibras do material que indicassem que estas estariam próximas da degradação completa. O geotêxtil B0-280 apresentava globalmente um aspecto muito semelhante ao geotêxtil B0-500.

A degradação sofrida pelos geotêxteis B0-280 e B0-500 durante os ensaios de termo-oxidação foi muito semelhante, não tendo sido observadas diferenças significativas que possam ser atribuídas ao facto dos materiais possuírem diferentes massas por unidade de área. Assim, não foram encontrados nenhuns indícios que a massa por unidade de área tenha alguma influência na degradação sofrida pelos materiais durante o ensaio de termo-oxidação.

### 7.3.1.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500

Os geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 (B2-280 e B2-500) não apresentaram sinais visíveis de degradação ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C. A cor dos materiais manteve-se quase inalterada (os materiais sofreram apenas um ligeiro escurecimento) e não foram perceptíveis odores a “plástico queimado”. As massas dos geotêxteis B2-280 e B2-500 mantiveram-se constantes durante

o ensaio, enquanto que as suas dimensões sofreram uma ligeira diminuição (redução semelhante à redução observada para os provetes de controlo). O Quadro 7.8 resume os valores da variação das dimensões dos geotêxteis B2-280 e B2-500.

Quadro 7.8 - Variação das dimensões dos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Variação das dimensões do geotêxtil B2-280 (%) | Variação das dimensões do geotêxtil B2-500 (%) |
|---------|--|--|
| 6 Horas | - 2,3  | - 2,4  |
| 14 Dias | - 2,2  | - 2,3  |
| 28 Dias | - 2,6  | - 2,5  |
| 42 Dias | - 2,7  | - 2,4  |
| 56 Dias | - 2,5  | - 2,5  |

(valores médios de 6 provetes)

A exposição dos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante 56 dias a 110 °C não provocou danos visíveis nos materiais, o que, desde logo, mostrou a importância do aditivo C944 na protecção das fibras de PP contra a oxidação induzida pela temperatura (na ausência do aditivo, os geotêxteis de PP estariam praticamente destruídos após 11 dias de termo-oxidação a 110 °C).

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidos no Quadro 7.9. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual são apresentados no Quadro 7.10. A Figura 7.6 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B2-280.

Do mesmo modo, o Quadro 7.11 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição a 110 °C. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 7.12. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500 estão representadas na Figura 7.7.

Quadro 7.9 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 13,1 (9,9%)                                 | 102 (5,5%)                   | <b>100</b>               |
| 14 Dias | 12,9 (4,2%)                                 | 86,5 (6,8%)                  | <b>98,5</b>              |
| 28 Dias | 12,6 (7,9%)                                 | 89,2 (4,3%)                  | <b>96,2</b>              |
| 42 Dias | 13,2 (9,0%)                                 | 88,0 (8,3%)                  | <b>101</b>               |
| 56 Dias | 12,8 (12%)                                  | 83,4 (4,0%)                  | <b>97,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.10 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                   |
| 6 Horas | 6,8  | 11,6   | 15,1  | 17,5  | 916                               | <b>93,9</b>           |
| 14 Dias | 7,6  | 13,0   | 17,1  | 19,5  | 873                               | <b>89,4</b>           |
| 28 Dias | 7,1  | 12,2   | 16,1  | 18,5  | 746                               | <b>76,4</b>           |
| 42 Dias | 6,5  | 11,4   | 15,3  | 17,6  | 720                               | <b>73,8</b>           |
| 56 Dias | 7,6  | 13,0   | 16,8  | 19,3  | 699                               | <b>71,6</b>           |

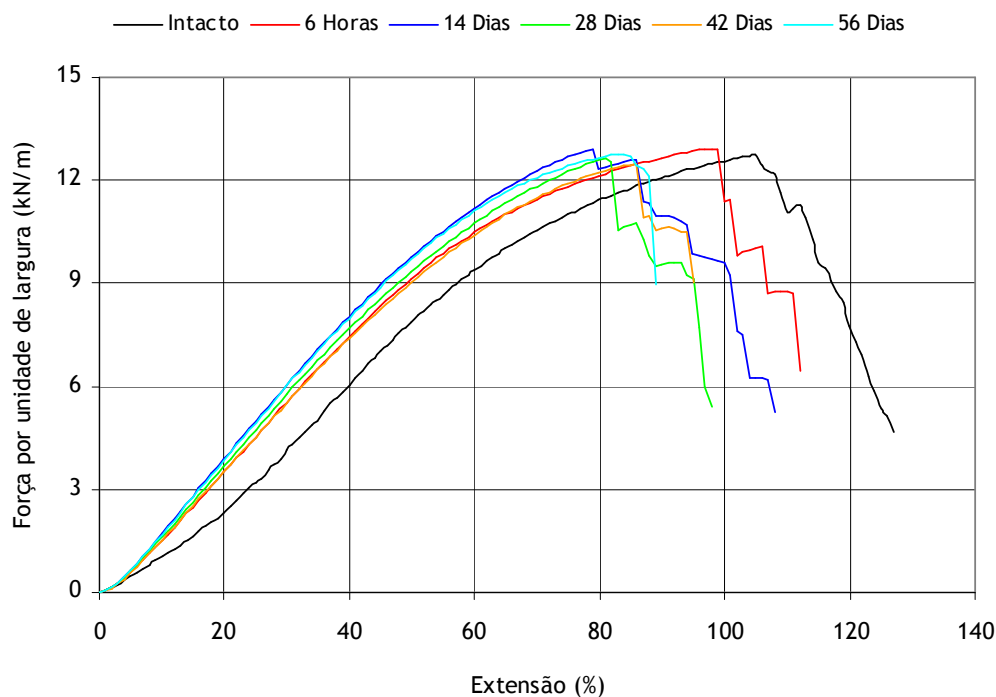


Figura 7.6 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

Quadro 7.11 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 25,8 (11%)                                  | 135 (8,0%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 26,1 (6,9%)                                 | 104 (8,9%)                   | <b>101</b>               |
| 14 Dias | 24,6 (5,2%)                                 | 93,0 (5,4%)                  | <b>95,3</b>              |
| 28 Dias | 24,4 (9,1%)                                 | 91,0 (7,5%)                  | <b>94,6</b>              |
| 42 Dias | 24,7 (9,1%)                                 | 89,7 (5,3%)                  | <b>95,7</b>              |
| 56 Dias | 24,8 (9,9%)                                 | 94,8 (3,6%)                  | <b>96,1</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



Quadro 7.12 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 15,8   | 29,4   | 36,8  | 38,9  | 2450                              | ---                      |
| 6 Horas | 27,0   | 34,7   | 39,1  | 40,0  | 2033                              | <b>83,0</b>              |
| 14 Dias | 30,6   | 38,1   | 41,7  | 41,5  | 1551                              | <b>63,3</b>              |
| 28 Dias | 30,7   | 37,7   | 41,2  | 40,8  | 1513                              | <b>61,8</b>              |
| 42 Dias | 29,3   | 37,2   | 41,4  | 41,4  | 1437                              | <b>58,7</b>              |
| 56 Dias | 32,0   | 39,3   | 42,9  | 42,2  | 1589                              | <b>64,9</b>              |

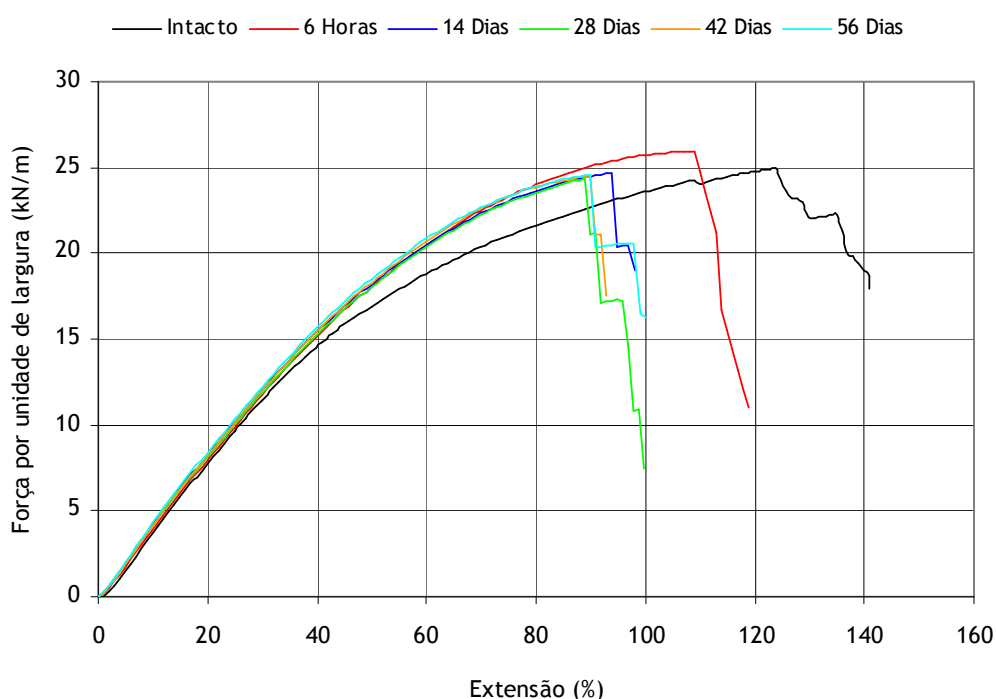


Figura 7.7 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

As resistências à tracção dos geotêxteis B2-280 e B2-500 mantiveram-se praticamente inalteradas após a exposição dos materiais durante 6 horas a 110 °C, ao passo que as respectivas extensões na força máxima sofreram uma pequena diminuição (tal como também já havia sido observado para os geotêxteis sem C944). A diminuição da extensão na força máxima foi acompanhada por uma redução da robustez dos materiais (robustez residual de 93,9% para o geotêxtil B2-280 e de 83,0% para o geotêxtil B2-500). A rigidez secante dos provetes de controlo sofreu um ligeiro aumento depois das 6 horas de exposição a 110 °C (aumento mais pronunciado para o geotêxtil B2-280).

A resistência à tracção dos geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 permaneceu mais ou menos inalterada ao longo dos ensaios de termo-oxidação. Após 56 dias de exposição, os geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam resistências residuais muito elevadas (97,7% para o geotêxtil B2-280 e 96,1% para o geotêxtil B2-500). Assim, a incorporação de uma pequena quantidade do aditivo C944 (0,2%) nas fibras de PP foi suficiente para retardar significativamente a oxidação dos materiais.

Ao fim de 14 dias de termo-oxidação, os valores da extensão na força máxima dos geotêxteis B2-280 e B2-500 eram inferiores aos valores dos provetes de controlo. No entanto, o aumento do tempo de exposição não causou alterações muito significativas nos valores da extensão na força máxima.

A robustez dos geotêxteis B2-280 e B2-500 diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 56 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 apresentava uma robustez residual de 71,6%, ao passo que o geotêxtil B2-500 possuía uma robustez residual de 64,9%; de um modo geral, a robustez diminuiu ligeiramente à medida que o tempo de exposição à termo-oxidação aumentou. Os valores de rigidez secante dos geotêxteis B2-280 e B2-500 determinados após os ensaios de termo-oxidação foram, de um modo geral, superiores aos valores de referência.

A observação dos geotêxteis B2-280 e B2-500 por MEV mostrou a inexistência de danos nos materiais após os ensaios de termo-oxidação. As amostras expostas possuíam um aspecto idêntico ao aspecto das amostras de referência, não tendo sido encontrados nenhuns sinais da ocorrência de degradação nos materiais.

#### 7.3.1.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500

À semelhança dos geotêxteis com 0,2% de C944, os geotêxteis com 0,4% de C944 (B4-280 e B4-500) também não apresentaram sinais visíveis de degradação ao longo dos 56 dias de termo-oxidação. A cor dos materiais sofreu um ligeiro escurecimento durante o ensaio e não foram perceptíveis odores a “plástico queimado”. A massa dos geotêxteis com 0,4% de C944 não sofreu alterações durante os ensaios de termo-oxidação. Os dois geotêxteis sofreram um ligeiro encolhimento após a exposição à termo-oxidação (encolhimentos semelhantes aos sofridos pelos provetes de controlo) (Quadro 7.13).

Quadro 7.13 - Variação das dimensões dos geotêxteis B4-280 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Variação das dimensões do geotêxtil B4-280 (%) | Variação das dimensões do geotêxtil B4-500 (%) |
|---------|--|--|
| 6 Horas | - 2,2  | - 2,3  |
| 14 Dias | - 2,8  | - 2,5  |
| 28 Dias | - 2,8  | - 2,9  |
| 42 Dias | - 2,6  | - 2,8  |
| 56 Dias | - 2,9  | - 2,7  |

(valores médios de 6 provetes)

Os Quadros 7.14 e 7.15 resumem os valores das propriedades mecânicas do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação. As curvas médias obtidas para o geotêxtil B4-280 encontram-se representadas na Figura 7.8.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-500, antes e após a exposição a 110 °C, estão resumidas no Quadro 7.16 e no Quadro 7.17. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B4-500 encontram-se ilustradas na Figura 7.9.

Quadro 7.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 14,0 (6,2%)                                  | 113 (7,8%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 13,6 (8,1%)                                  | 101 (6,7%)                   | <b>97,1</b>              |
| 14 Dias | 13,4 (6,9%)                                  | 88,3 (8,6%)                  | <b>95,7</b>              |
| 28 Dias | 13,2 (12%)                                   | 86,3 (7,7%)                  | <b>94,3</b>              |
| 42 Dias | 13,7 (8,7%)                                  | 82,4 (5,2%)                  | <b>97,9</b>              |
| 56 Dias | 13,2 (7,4%)                                  | 81,7 (5,0%)                  | <b>94,3</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 15,7  | 15,4  | 15,1   | 16,1   | 1135                            | ---                   |
| 6 Horas | 7,3   | 12,4  | 15,9   | 18,3   | 945                             | <b>83,3</b>           |
| 14 Dias | 7,6   | 13,1  | 17,2   | 19,5   | 846                             | <b>74,5</b>           |
| 28 Dias | 7,3   | 12,5  | 16,6   | 19,1   | 784                             | <b>69,1</b>           |
| 42 Dias | 8,5   | 14,3  | 18,2   | 20,5   | 797                             | <b>70,2</b>           |
| 56 Dias | 7,9   | 13,5  | 17,6   | 20,1   | 750                             | <b>66,1</b>           |

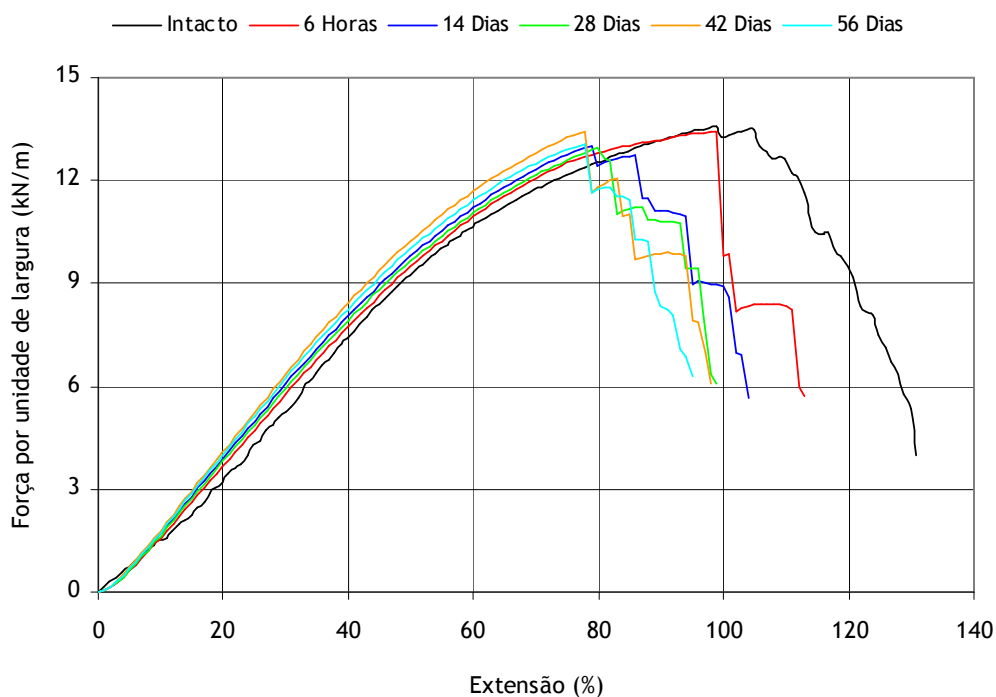


Figura 7.8 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

Quadro 7.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 26,4 (5,6%)                                 | 140 (5,7%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 26,3 (6,8%)                                 | 99,4 (5,5%)                  | <b>99,6</b>              |
| 14 Dias | 25,7 (12%)                                  | 90,3 (6,1%)                  | <b>97,3</b>              |
| 28 Dias | 25,7 (7,4%)                                 | 86,7 (10%)                   | <b>97,3</b>              |
| 42 Dias | 25,0 (7,2%)                                 | 90,8 (3,9%)                  | <b>94,7</b>              |
| 56 Dias | 24,5 (7,2%)                                 | 88,1 (8,0%)                  | <b>92,8</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 17,3                                      | 30,6                                      | 36,7                                       | 38,3                                       | 2595                           | ---                   |
| 6 Horas | 30,8                                      | 38,1                                      | 42,4                                       | 42,5                                       | 1939                           | <b>74,7</b>           |
| 14 Dias | 34,4                                      | 41,9                                      | 45,8                                       | 44,8                                       | 1718                           | <b>66,2</b>           |
| 28 Dias | 28,6                                      | 40,2                                      | 46,0                                       | 45,8                                       | 1522                           | <b>58,7</b>           |
| 42 Dias | 32,8                                      | 40,1                                      | 44,1                                       | 43,3                                       | 1482                           | <b>57,1</b>           |
| 56 Dias | 32,5                                      | 39,3                                      | 43,3                                       | 42,6                                       | 1462                           | <b>56,3</b>           |

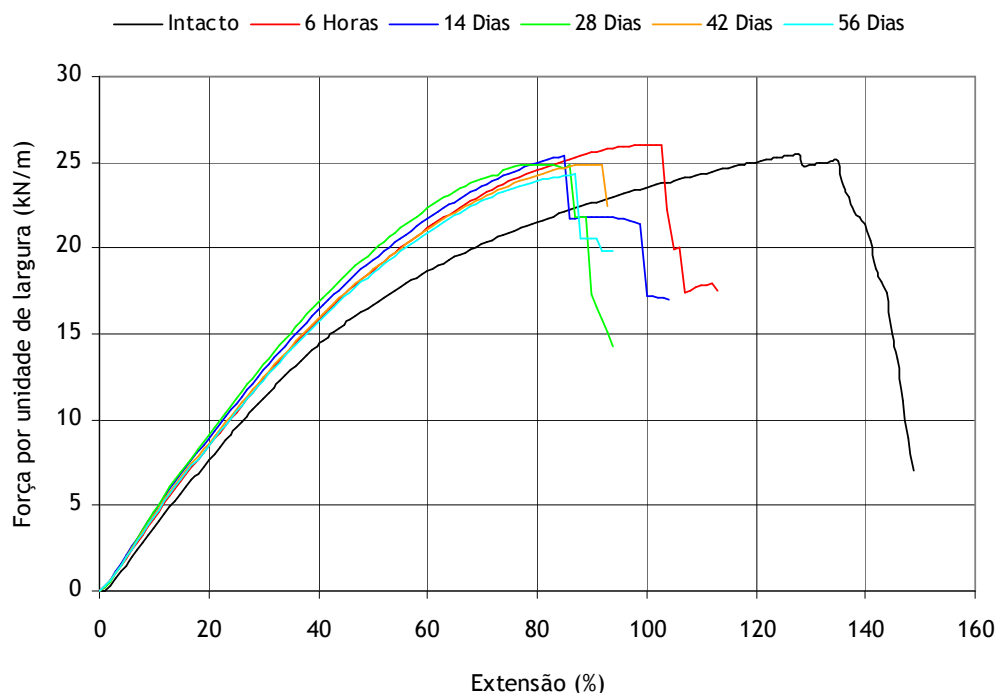


Figura 7.9 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

As resistências à tracção dos provetes de controlo não sofreram alterações (resistências residuais de 97,1% e 99,6% para os geotêxteis B4-280 e B4-500, respectivamente), enquanto que as respectivas extensões na força máxima sofreram uma diminuição (de 113% para 101% no geotêxtil B4-280 e de 140% para 99,4% no geotêxtil B4-500). A robustez dos provetes de controlo também diminuiu após as 6 horas de exposição a 110 °C (robustez residual de 83,3% para o geotêxtil B4-280 e de 74,7% para o geotêxtil B4-500).

As resistências à tracção dos geotêxteis B4-280 e B4-500 não foram muito afectadas pela exposição dos materiais à termo-oxidação. De facto, após 56 dias de exposição, os geotêxteis B4-280 e B4-500 possuíam resistências residuais bastante elevadas (94,3% e 92,8%, respectivamente). Ao fim de 14 dias de termo-oxidação, a extensão na força máxima sofreu uma pequena diminuição relativamente aos provetes de controlo. De facto, após 14 dias de exposição, o geotêxtil B4-280 apresentava uma extensão na força máxima de 88,3% (101% nos provetes de controlo) e o geotêxtil B4-500 possuía uma extensão na força máxima de 90,3% (99,4% nos provetes de controlo). Os valores da extensão na força máxima não sofreram grandes variações com o aumento do tempo de exposição ao ensaio de termo-oxidação.

À semelhança dos geotêxteis com 0,2% de C944, a robustez dos geotêxteis estabilizados com 0,4% de C944 também diminuiu após a exposição a 110 °C. Ao fim de 56 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B4-280 possuía uma robustez residual de 66,1%, enquanto que o geotêxtil B4-500 apresentava uma robustez residual de 56,3%. De um modo geral, a rigidez secante dos geotêxteis aumentou após os ensaios de termo-oxidação (excepções para a rigidez secante do geotêxtil B4-280 determinada a 2% e a 5% de extensão).

A caracterização dos geotêxteis por MEV após os ensaios de termo-oxidação mostrou a inexistência de danos nos materiais. As fibras de PP expostas à termo-oxidação possuíam um aspecto idêntico às fibras das amostras de referência.

#### **7.3.1.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500**

Os geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 e 1,08% de negro de carbono (P2-280 e P2-500) não apresentaram sinais visíveis de degradação durante os 56 dias de termo-oxidação a 110 °C. A cor dos materiais não sofreu alterações durante os ensaios (mantiveram a cor preta original), nem foram perceptíveis odores provenientes do forno. A massa dos provetes manteve-se constante durante os ensaios e as suas dimensões sofreram reduções semelhantes às reduções sofridas pelos provetes de controlo (Quadro 7.18).

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidos no Quadro 7.19. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual são apresentados no Quadro 7.20. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação, estão ilustradas na Figura 7.10.

O Quadro 7.21 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 7.22. As curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, obtidas antes e após a exposição aos ensaios de termo-oxidação a 110 °C, estão representadas na Figura 7.11.

Quadro 7.18 - Variação das dimensões dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Variação das dimensões do geotêxtil P2-280 (%) | Variação das dimensões do geotêxtil P2-500 (%) |
|---------|--|--|
| 6 Horas | - 2,2  | - 2,1  |
| 14 Dias | - 2,4  | - 2,3  |
| 28 Dias | - 2,3  | - 2,6  |
| 42 Dias | - 2,2  | - 2,4  |
| 56 Dias | - 2,6  | - 2,7  |

(valores médios de 6 provetes)

Quadro 7.19 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 14,3 (8,2%)                                 | 80,3 (7,3%)                  | ---                      |
| 6 Horas | 14,4 (7,5%)                                 | 72,6 (10%)                   | <b>101</b>               |
| 14 Dias | 13,7 (9,4%)                                 | 68,2 (6,8%)                  | <b>95,8</b>              |
| 28 Dias | 13,2 (4,6%)                                 | 69,0 (6,1%)                  | <b>92,3</b>              |
| 42 Dias | 13,7 (14%)                                  | 66,6 (6,7%)                  | <b>95,8</b>              |
| 56 Dias | 13,5 (5,6%)                                 | 70,2 (3,3%)                  | <b>94,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.20 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 24,9                                      | 23,8                                      | 23,0                                       | 23,9                                       | 786                            | ---                   |
| 6 Horas | 12,3                                      | 18,2                                      | 20,5                                       | 23,1                                       | 674                            | <b>85,8</b>           |
| 14 Dias | 14,0                                      | 19,4                                      | 21,4                                       | 23,2                                       | 634                            | <b>80,7</b>           |
| 28 Dias | 12,5                                      | 17,8                                      | 19,7                                       | 21,8                                       | 603                            | <b>76,7</b>           |
| 42 Dias | 14,3                                      | 19,4                                      | 22,2                                       | 23,9                                       | 581                            | <b>73,9</b>           |
| 56 Dias | 13,7                                      | 19,1                                      | 21,0                                       | 22,8                                       | 614                            | <b>78,1</b>           |

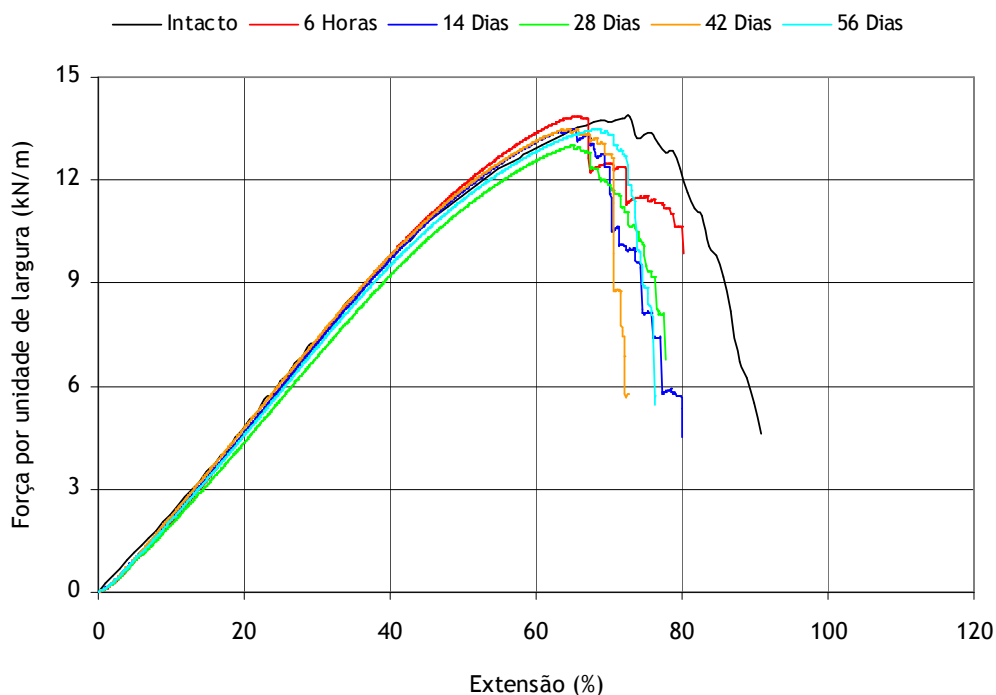


Figura 7.10 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

Quadro 7.21 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 25,6 (7,1%)                                  | 117 (6,1%)                   | ---                      |
| 6 Horas | 25,9 (9,4%)                                  | 98,5 (6,6%)                  | <b>101</b>               |
| 14 Dias | 25,6 (7,6%)                                  | 87,3 (4,8%)                  | <b>100</b>               |
| 28 Dias | 25,2 (8,1%)                                  | 86,8 (7,3%)                  | <b>98,4</b>              |
| 42 Dias | 24,6 (8,8%)                                  | 87,6 (6,2%)                  | <b>96,1</b>              |
| 56 Dias | 24,8 (9,3%)                                  | 84,2 (7,5%)                  | <b>96,9</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.22 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 16,7  | 29,8  | 37,1   | 39,4   | 1979                            | ---                   |
| 6 Horas | 41,4  | 45,0  | 47,7   | 46,8   | 1728                            | <b>87,3</b>           |
| 14 Dias | 42,2  | 44,0  | 47,3   | 46,5   | 1617                            | <b>81,7</b>           |
| 28 Dias | 41,9  | 44,5  | 47,5   | 46,7   | 1570                            | <b>79,3</b>           |
| 42 Dias | 38,6  | 41,1  | 44,4   | 44,2   | 1470                            | <b>74,3</b>           |
| 56 Dias | 39,8  | 43,3  | 46,1   | 45,6   | 1339                            | <b>67,7</b>           |

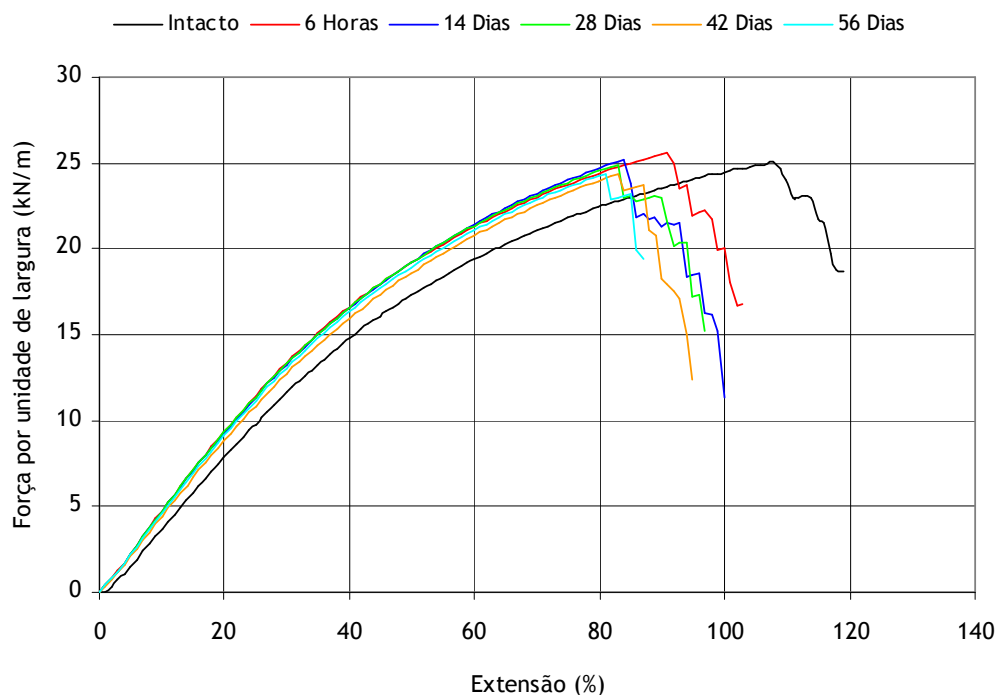


Figura 7.11 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C.

À semelhança de todos os geotêxteis anteriores, as resistências à tracção dos provetes de controlo dos geotêxteis P2-280 e P2-500 não sofreram alterações significativas, enquanto que as respectivas extensões na força máxima sofreram uma ligeira redução (de 80,3% para 72,6% no geotêxtil P2-280 e de 117% para 98,5% no geotêxtil P2-500). A robustez dos geotêxteis P2-280 e P2-500 também sofreu uma diminuição após a exposição dos materiais a 110 °C durante 6 horas (robustez residual de 85,8% para o geotêxtil P2-280 e de 87,3% para o geotêxtil P2-500).

As resistências à tracção dos geotêxteis pretos não sofreram alterações muito significativas após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 56 dias de exposição, os materiais apresentavam resistências residuais elevadas (94,4% e 96,9% para os geotêxteis P2-280 e P2-500, respectivamente). A extensão na força máxima dos materiais, após uma diminuição inicial relativamente aos provetes de controlo, não sofreu grandes alterações durante os ensaios de termo-oxidação.

A robustez dos geotêxteis P2-280 e P2-500 diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. De facto, ao fim de 56 dias de exposição, os geotêxteis P2-280 e P2-500 apresentavam uma robustez residual de 78,1% e de 67,6%, respectivamente. Ao contrário do geotêxtil P2-280, os valores da rigidez secante do geotêxtil P2-500, após os ensaios de termo-oxidação, foram superiores aos valores de referência.

A análise dos geotêxteis P2-280 e P2-500 por MEV mostrou a inexistência de danos nos materiais. Os provetes expostos à termo-oxidação possuíam um aspecto semelhante aos provetes de referência.



### 7.3.1.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis à oxidação induzida pela temperatura

Os geotêxteis não estabilizados (B0-280 e B0-500) apresentaram uma baixa resistência à exposição a 110 °C (após 9 dias de termo-oxidação, a resistência à tracção destes materiais era nula), enquanto que os geotêxteis estabilizados (B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500) exibiram uma boa resistência à termo-oxidação (a resistência à tracção destes materiais não sofreu alterações muito significativas durante os 56 dias de exposição a 110 °C). Deste modo, os ensaios de termo-oxidação realizados permitiram distinguir, em termos de resistência à oxidação induzida pela temperatura, os geotêxteis estabilizados dos geotêxteis não estabilizados.

A Figura 7.12 compara a evolução da resistência residual dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de 280 g.m<sup>-2</sup> ao longo dos 56 dias de exposição a 110 °C. Identicamente, a Figura 7.13 compara as resistências residuais dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de 500 g.m<sup>-2</sup>.

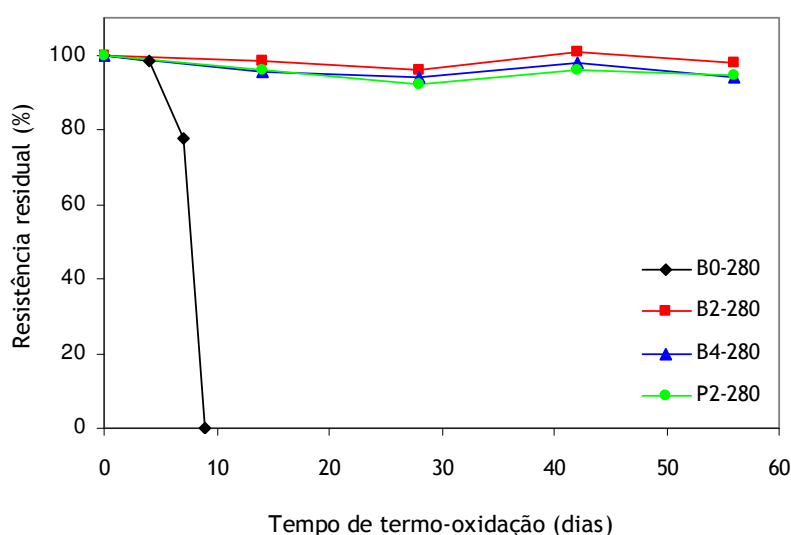


Figura 7.12 - Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

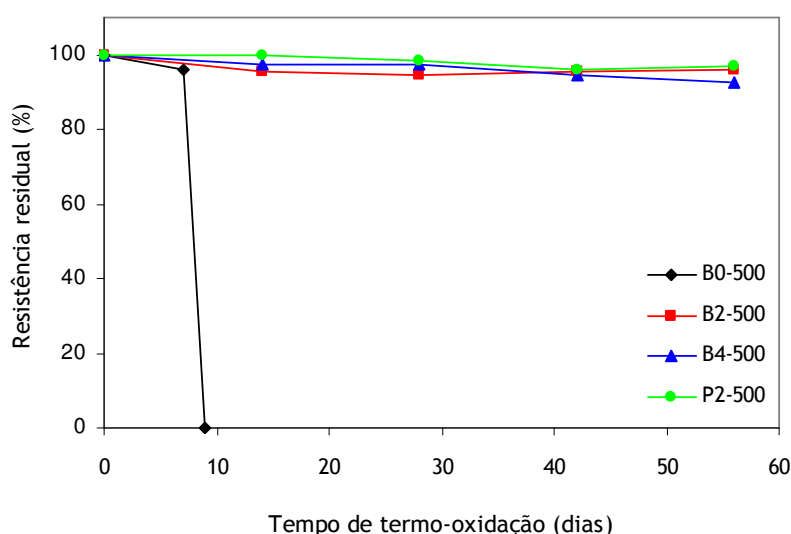


Figura 7.13 - Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

A resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação aumentou consideravelmente pela incorporação do aditivo químico C944 na composição dos materiais. A incorporação de 0,2% de C944 foi suficiente para retardar a degradação provocada pela termo-oxidação, não existindo diferenças significativas entre os materiais estabilizados com 0,2% de C944 e os materiais estabilizados com 0,4% de C944. Assim, os 56 dias de termo-oxidação não foram suficientes para distinguir, em termos de resistência à oxidação induzida pela temperatura, os geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 dos geotêxteis estabilizados com 0,4% de C944. A exposição destes materiais durante um intervalo de tempo mais elevado (vários meses ou alguns anos) poderia permitir a sua distinção.

À semelhança dos restantes geotêxteis estabilizados, os geotêxteis pretos também apresentaram uma boa resistência à oxidação induzida pela temperatura. Deste modo, não foi possível concluir qual o contributo, se algum, do negro de carbono para a protecção dos materiais contra os efeitos da termo-oxidação. A exposição dos materiais a 110 °C durante um período de tempo mais elevado poderia também elucidar qual o efeito do negro de carbono na resistência dos materiais à oxidação induzida pela temperatura.

Os geotêxteis com a mesma composição, mas com diferentes massas por unidade de área, exibiram uma resistência à termo-oxidação semelhante. De facto, os geotêxteis sem C944, apesar de terem massas por unidade de área diferentes, sofreram uma degradação muito semelhante (após 9 dias de termo-oxidação, ambos os materiais apresentavam uma resistência residual nula). Assim, não foram encontrados quaisquer indícios que a massa por unidade de área tenha algum efeito na degradação sofrida pelos materiais durante o ensaio de termo-oxidação.

#### **7.3.1.7 - Considerações finais**

Os ensaios de exposição a 110 °C mostraram que os geotêxteis não estabilizados possuem uma má resistência à termo-oxidação. A incorporação do aditivo C944 resultou num aumento considerável da resistência dos materiais à oxidação induzida pela temperatura. Assim, é indispensável adicionar aditivos químicos, tais como o C944, aos geotêxteis de PP para aumentar a sua durabilidade quando expostos a condições termo-oxidativas.

Os ensaios de termo-oxidação realizados permitiram distinguir, em termos de resistência à oxidação induzida pela temperatura, os materiais estabilizados dos materiais não estabilizados. No entanto, os 56 dias de termo-oxidação não foram suficientes para distinguir os materiais com diferentes tipos de estabilização (a exposição durante um intervalo de tempo maior poderia permitir distinguir os materiais). Assim, em seguida (ponto 7.3.2) é apresentado um estudo sobre o efeito do tempo de exposição na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação.

Os geotêxteis sem C944 sofreram uma degradação muito rápida quando expostos à temperatura de 110 °C (resistência à tracção nula após apenas 9 dias de exposição). No ponto 7.3.3 é apresentado um estudo sobre o efeito da temperatura na velocidade de degradação do geotêxtil B0-280.

### 7.3.2 - Efeito do tempo de exposição na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

#### 7.3.2.1 - Considerações iniciais

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 permaneceu praticamente inalterada durante os 56 dias de termo-oxidação a 110 °C. Assim, o processo de oxidação das fibras de PP (processo muito rápido na ausência de estabilizantes) foi inibido e/ou retardado pela incorporação de C944. Deste modo, é importante estudar qual o efeito do aumento do tempo de exposição na resistência dos materiais à oxidação induzida pela temperatura.

Assim, o geotêxtil B2-280 foi exposto a 110 °C durante períodos de tempo relativamente longos (304 dias de exposição máxima). Ao longo dos 304 dias de exposição, foram recolhidas várias amostras do geotêxtil B2-280 para caracterização (recolhas aos 89, 131, 164, 187, 236 e 304 dias de exposição).

A exposição dos geotêxteis à termo-oxidação a 110 °C durante períodos de tempo elevados (vários meses ou alguns anos) poderia permitir distinguir, em termos de resistência à oxidação, os materiais com diferentes estabilizações. No entanto, e dado o elevado tempo de exposição necessário para um ensaio deste tipo, apenas foi possível realizar este estudo para o geotêxtil B2-280.

#### 7.3.2.2 - Resultados obtidos

A cor do geotêxtil B2-280 sofreu um pequeno escurecimento ao longo dos 304 dias de exposição a 110 °C (o branco original adquiriu uma coloração um pouco acinzentada) e não foram perceptíveis odores a “plástico queimado”. A massa do geotêxtil B2-280 manteve-se inalterada, ao passo que as suas dimensões sofreram uma pequena diminuição (encolhimento característico que também ocorre nos provetes de controlo expostos durante 6 horas a 110 °C).

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidas nos Quadros 7.23 e 7.24. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B2-280 estão ilustradas na Figura 7.14.

Quadro 7.23 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 89 Dias  | 11,8 (4,8%)                                 | 74,7 (9,3%)                  | <b>90,1</b>              |
| 131 Dias | 10,8 (5,0%)                                 | 78,9 (8,4%)                  | <b>82,4</b>              |
| 164 Dias | 9,19 (9,9%)                                 | 79,2 (7,8%)                  | <b>70,2</b>              |
| 187 Dias | 8,81 (2,0%)                                 | 75,6 (4,2%)                  | <b>67,3</b>              |
| 236 Dias | 7,19 (5,9%)                                 | 63,0 (6,3%)                  | <b>54,9</b>              |
| 304 Dias | 6,90 (14%)                                  | 57,6 (6,9%)                  | <b>52,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.24 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo    | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|----------|--|--|---|---|-----------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                   |
| 89 Dias  | 5,0  | 9,3  | 13,3  | 16,3  | 562                               | 57,6                  |
| 131 Dias | 3,8  | 6,5  | 9,8   | 12,8  | 527                               | 54,0                  |
| 164 Dias | 2,3  | 3,9  | 6,6   | 9,0   | 402                               | 41,2                  |
| 187 Dias | 2,5  | 4,6  | 7,6   | 10,1  | 370                               | 37,9                  |
| 236 Dias | 2,0  | 3,9  | 7,0   | 9,8   | 342                               | 35,0                  |
| 304 Dias | 2,3  | 4,6  | 8,1   | 11,4  | 269                               | 27,6                  |

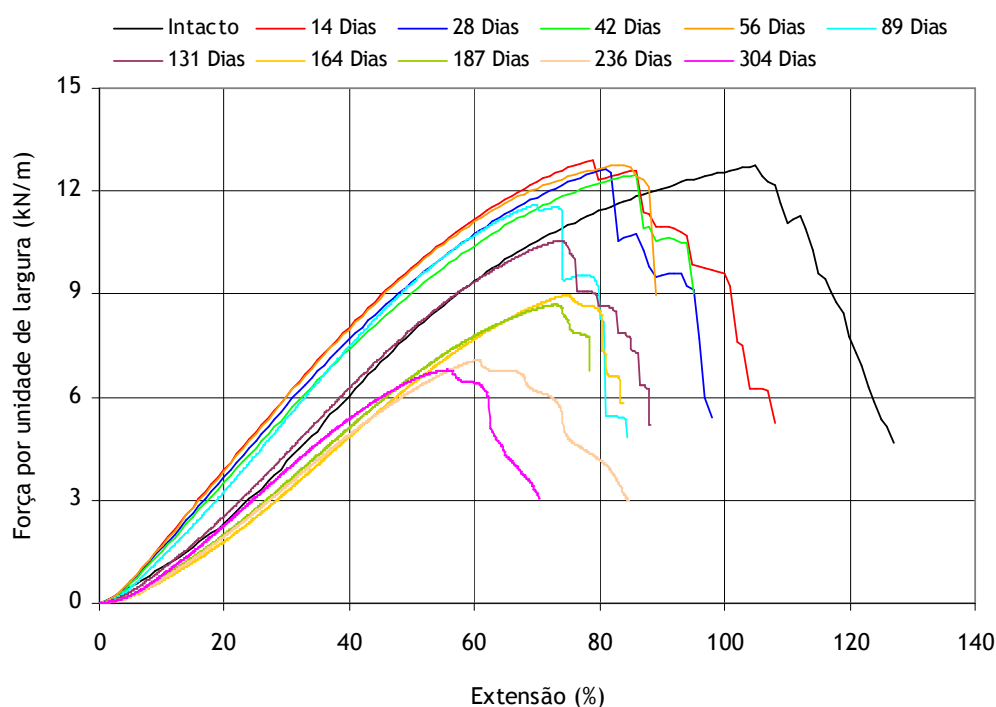


Figura 7.14 - Curvas médias força-estiramento do geotêxtil B2-280, antes e durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição à termo-oxidação. Após 89 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía uma resistência residual de 90,1% (ao fim de 56 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 apresentava uma resistência residual de 97,7%). Após 187 e 304 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía resistências residuais de 67,3% e 52,7%, respectivamente. Os valores da extensão na força máxima também sofreram uma redução com o aumento do tempo de exposição a 110 °C. Ao fim de 304 dias, o geotêxtil B2-280 apresentava uma extensão na força máxima de 57,6%, um valor bastante inferior ao valor obtido nos provetes de controlo (102%).

A robustez do geotêxtil B2-280 diminuiu com o aumento do tempo de exposição a 110 °C. De facto, após 89 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía uma robustez residual de 57,6% (ao fim de 56 dias de exposição, a robustez residual era de 71,6%). O geotêxtil B2-280 apresentava uma robustez residual de 37,9% e de 27,6% após 187 dias e 304 dias de exposição, respectivamente. De um modo geral, os valores de rigidez secante dos provetes expostos durante um intervalo de tempo igual ou superior a 131 dias foram inferiores aos valores de referência.

A observação do geotêxtil B2-280 por MEV mostrou a inexistência de danos nos materiais. Após 304 dias de termo-oxidação, os provetes expostos possuíam um aspecto idêntico ao aspecto dos provetes de referência.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 diminuiu muito lentamente com o aumento do tempo de termo-oxidação (ao contrário do que aconteceu para os geotêxteis sem C944, onde a resistência à tracção diminuiu, em 2 dias, de valores muito elevados para zero). A Figura 7.15 ilustra a evolução da resistência residual e da robustez residual do geotêxtil B2-280 durante os 304 dias de exposição a 110 °C.

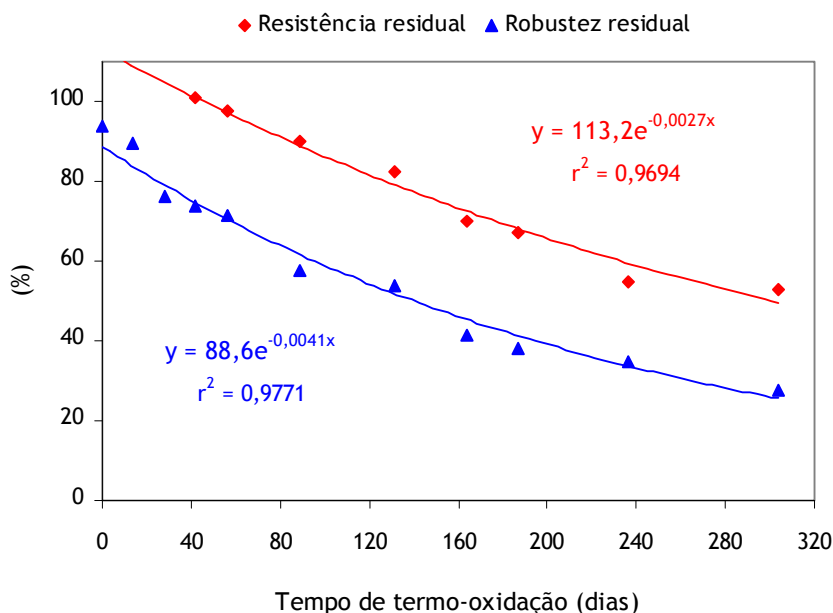


Figura 7.15 - Evolução da resistência residual e da robustez residual do geotêxtil B2-280 durante os 304 dias de termo-oxidação a 110 °C.

A Figura 7.15 mostra que resistência e a robustez residuais do geotêxtil B0-280 diminuíram de forma exponencial ao longo dos 304 dias de termo-oxidação. Assim, e através de um ajuste exponencial dos valores experimentais obtidos, pode ser estimado que serão necessários cerca de 1155 dias para a resistência residual do geotêxtil B2-280 atingir os 5% e cerca de 701 dias para a robustez residual atingir os mesmos 5% (admitindo que a velocidade do processo de degradação não sofre nenhuma alteração). Deste modo, a degradação quase total do geotêxtil B2-280 ocorrerá entre os 701 dias e os 1155 dias de exposição à termo-oxidação. Tendo em conta que a degradação total do geotêxtil B0-280 ocorreu após 9 dias de exposição, então, a incorporação de 0,2% de C944 nas fibras de PP resultou num aumento muito considerável da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação.

### 7.3.3 - Efeito da temperatura na velocidade de degradação do geotêxtil B0-280

#### 7.3.3.1 - Considerações iniciais

Os geotêxteis sem C944 (B0-280 e B0-500) apresentaram uma resistência muito baixa à exposição a 110 °C. De facto, após 9 dias de termo-oxidação, ambos os materiais já possuíam uma resistência residual nula. Assim, é importante estudar o efeito da diminuição da temperatura na velocidade de degradação dos geotêxteis de PP.

Para tal, o geotêxtil B0-280 foi exposto à termo-oxidação a várias temperaturas (100 °C, 90 °C e 80 °C), durante diferentes períodos de tempo. Os ensaios foram realizados até à degradação completa dos provetes expostos (resistência residual nula).

Deste modo, foi possível determinar o tempo necessário para a degradação completa do geotêxtil B0-280 a temperaturas inferiores a 110 °C. Os resultados experimentais obtidos foram usados para estimar a velocidade de degradação do geotêxtil B0-280 a temperaturas próximas da temperatura ambiente.

#### 7.3.3.2 - Ensaios de termo-oxidação a 100 °C

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C, encontram-se resumidas nos Quadros 7.25 e 7.26. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B0-280 estão ilustradas na Figura 7.16.

Quadro 7.25 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| 7 Dias  | 14,2 (13%)                                  | 93,3 (7,2%)                  | <b>103</b>               |
| 12 Dias | 13,2 (5,8%)                                 | 89,6 (5,6%)                  | <b>95,7</b>              |
| 16 Dias | 6,56 (47%)                                  | 46,6 (49%)                   | <b>47,5</b>              |
| 19 Dias | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.26 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| 7 Dias  | 9,8                                       | 13,0                                      | 15,0                                       | 17,4                                       | 744                            | <b>70,7</b>           |
| 12 Dias | 9,7                                       | 12,5                                      | 14,2                                       | 16,6                                       | 714                            | <b>67,8</b>           |
| 16 Dias | 11,5                                      | 14,4                                      | 16,0                                       | 17,1                                       | 133                            | <b>12,6</b>           |
| 19 Dias | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

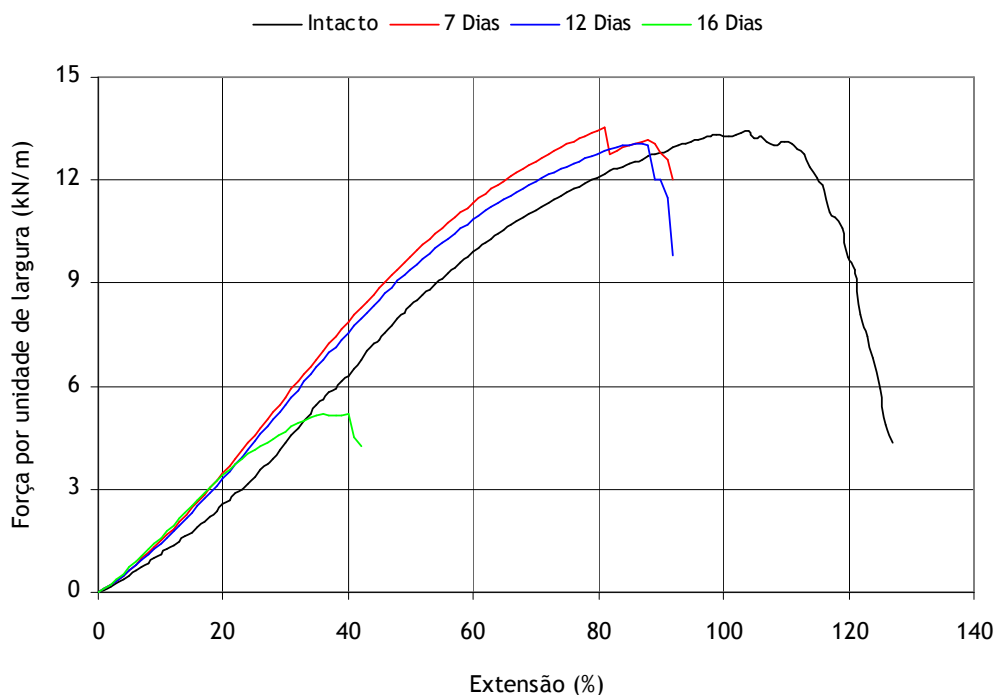


Figura 7.16 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 100 °C.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 manteve-se sem grandes alterações durante os primeiros 12 dias de termo-oxidação a 100 °C. De facto, após 12 dias de exposição, o geotêxtil B0-280 possuía uma resistência residual de 95,7%. No entanto, 4 dias depois (ao 16.º dia), a resistência residual do geotêxtil B0-280 estava reduzida para 47,5%; ao fim de 19 dias de exposição, o material apresentava uma resistência à tracção nula. A extensão na força máxima e a robustez diminuíram à medida que aumentou o tempo de exposição a 100°C. Os valores de rigidez secante dos provetes expostos foram superiores aos valores de referência.

A 100 °C, foram necessários 19 dias para a degradação completa do geotêxtil B0-280, cerca do dobro do tempo necessário a 110 °C (9 dias). Assim, e tal como era esperado, a velocidade de degradação dos geotêxteis de PP diminuiu consideravelmente com a diminuição da temperatura.

### 7.3.3.3 - Ensaios de termo-oxidação a 90 °C

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C, encontram-se resumidos no Quadro 7.27. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual são apresentados no Quadro 7.28. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C, estão representadas na Figura 7.17.

Quadro 7.27 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 13,3 (11%)                                  | 97,0 (7,3%)                  | <b>96,4</b>              |
| 21 Dias | 12,7 (4,0%)                                 | 91,3 (7,2%)                  | <b>92,0</b>              |
| 28 Dias | 10,6 (27%)                                  | 77,7 (20%)                   | <b>76,8</b>              |
| 35 Dias | 1,51 (90%)                                  | 18,4 (71%)                   | <b>10,9</b>              |
| 36 Dias | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.28 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| 14 Dias | 7,1                                       | 10,2                                      | 12,6                                       | 15,1                                       | 738                            | <b>70,1</b>           |
| 21 Dias | 5,3                                       | 8,8                                       | 11,7                                       | 14,3                                       | 808                            | <b>76,7</b>           |
| 28 Dias | 6,2                                       | 10,0                                      | 12,6                                       | 15,2                                       | 592                            | <b>56,2</b>           |
| 35 Dias | 7,2                                       | 9,0                                       | 7,3  | 5,7  | 20,3                           | <b>1,9</b>            |
| 36 Dias | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

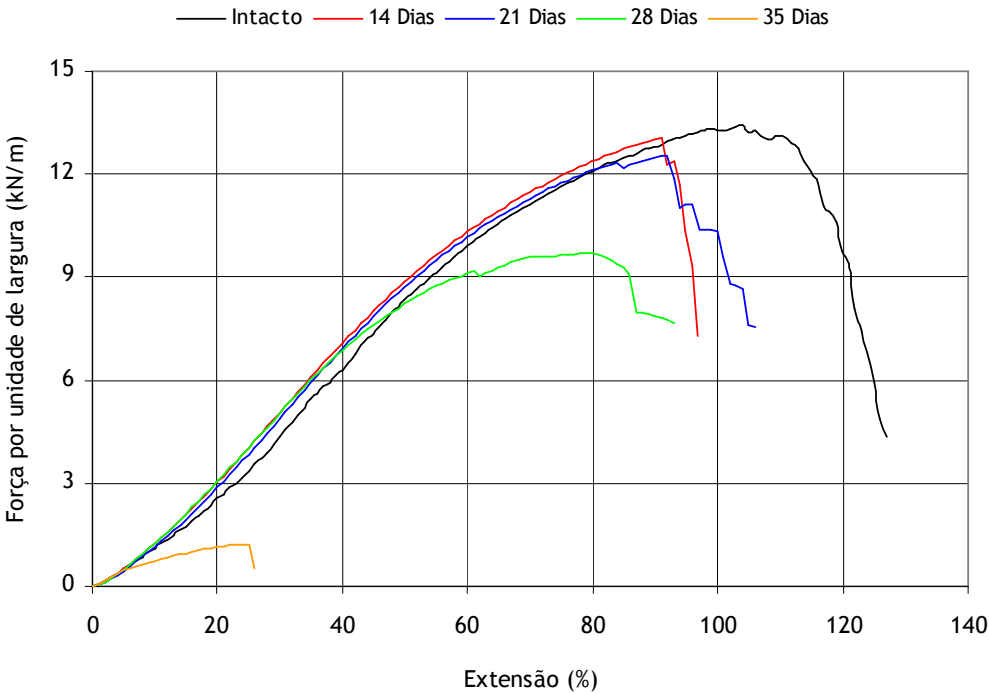


Figura 7.17 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C.



A 90 °C, a diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B0-280 não foi muito acentuada durante os primeiros 21 dias de termo-oxidação. De facto, após 21 dias de exposição, o material possuía uma resistência residual de 92,0%. Entre o 28.º dia e o 35.º dia de exposição, a resistência residual do geotêxtil B0-280 passou de 76,8% para 10,9%. Ao fim de 36 dias, a resistência à tracção do geotêxtil B0-280 estava reduzida a zero. A extensão na força máxima e a robustez também diminuíram após os ensaios de termo-oxidação a 90 °C. Os valores de rigidez secante dos provetes expostos durante 14, 21 e 28 dias não apresentavam grandes alterações relativamente aos valores de referência. Os provetes expostos durante 35 dias possuíam valores de rigidez secante (às extensões de 10% e 20%) bastante inferiores aos valores de referência.

A 90 °C, a degradação completa do geotêxtil B0-280 ocorreu em 36 dias, cerca do dobro do tempo necessário a 100 °C (19 dias) e 4 vezes mais do que o tempo necessário a 110 °C (9 dias). Logo, os resultados obtidos mais uma vez confirmam que a velocidade de degradação dos geotêxteis de PP é altamente dependente da temperatura.

#### 7.3.3.4 - Ensaios de termo-oxidação a 80 °C

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C, encontram-se resumidas no Quadro 7.29 e no Quadro 7.30. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C, estão ilustradas na Figura 7.18.

Quadro 7.29 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| 26 Dias | 14,1 (11%)                                  | 110 (11%)                    | <b>102</b>               |
| 42 Dias | 14,4 (6,5%)                                 | 104 (6,3%)                   | <b>104</b>               |
| 57 Dias | 13,4 (6,6%)                                 | 87,6 (7,0%)                  | <b>97,1</b>              |
| 70 Dias | 0,78 (24%)                                  | 7,6 (17%)                    | <b>5,7</b>               |
| 71 Dias | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.30 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| 26 Dias | 8,0                                       | 11,0                                      | 13,1                                       | 15,2                                       | 1066                           | <b>101</b>            |
| 42 Dias | 6,3                                       | 10,3                                      | 13,5                                       | 16,1                                       | 943                            | <b>89,6</b>           |
| 57 Dias | 6,5                                       | 10,9                                      | 14,1                                       | 16,8                                       | 894                            | <b>84,9</b>           |
| 70 Dias | 10,4                                      | 11,3                                      | 6,5  | ---  | 6,9                            | <b>0,7</b>            |
| 71 Dias | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

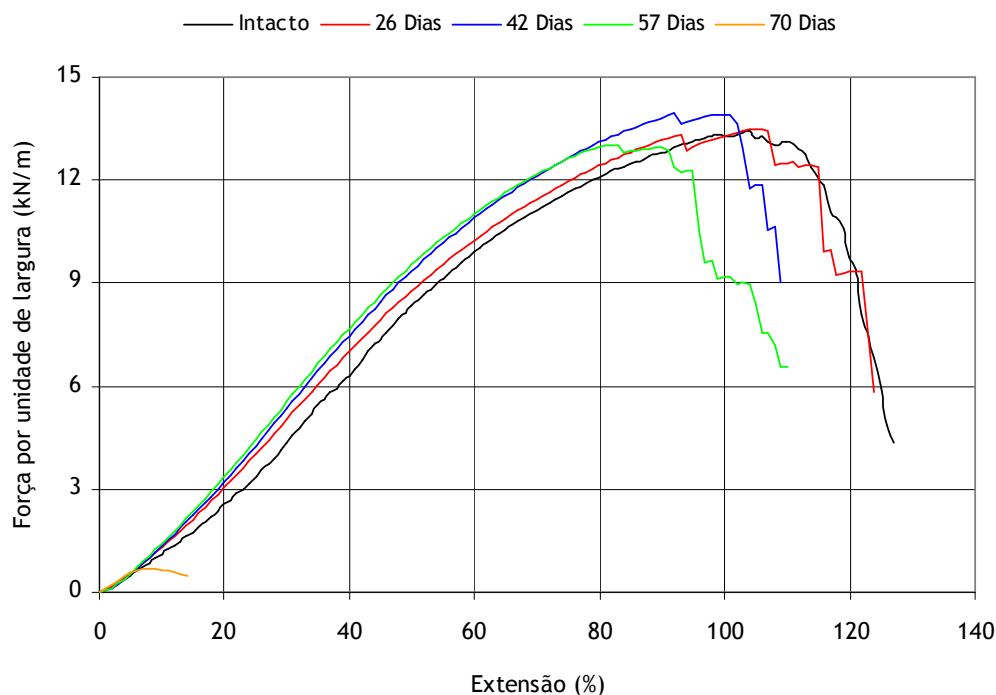


Figura 7.18 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios de termo-oxidação a 80 °C.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 manteve-se sem grandes alterações durante os primeiros 57 dias de termo-oxidação a 80 °C (após 57 dias de exposição, o geotêxtil B0-280 ainda possuía uma resistência residual de 97,1%). Depois do 57.º dia de ensaio, a diminuição da resistência à tracção ocorreu muito rapidamente. De facto, após 70 dias de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava uma resistência residual de apenas 5,7%, estando muito próximo da degradação completa (que viria a ocorrer ao 71.º dia de exposição). A extensão na força máxima e a robustez diminuíram à medida que aumentou o tempo de termo-oxidação.

A 80 °C, foram necessários 71 dias para a degradação completa do geotêxtil B0-280, cerca do dobro do tempo necessário a 90 °C (36 dias), cerca de 4 vezes mais do que o tempo necessário a 100 °C (19 dias) e cerca de 8 vezes mais que o tempo necessário a 110 °C (9 dias). Os resultados obtidos estão de acordo com uma regra empírica, muitas vezes usada pelos Químicos, que pressupõe que, numa reacção “típica”, a velocidade da reacção duplica quando a temperatura aumenta 10 °C.

#### 7.3.3.5 - Comparação da velocidade de degradação a diferentes temperaturas

A velocidade de degradação do geotêxtil B0-280 durante os ensaios de termo-oxidação foi altamente dependente da temperatura. À medida que a temperatura do ensaio de termo-oxidação diminuiu, o processo de oxidação do geotêxtil B0-280 ocorreu mais lentamente. A Figura 7.19 ilustra a evolução da resistência residual do geotêxtil B0-280 durante a exposição a diferentes temperaturas. O Quadro 7.31 resume os tempos necessários, às diferentes temperaturas, para o geotêxtil B0-280 atingir uma resistência residual de 50% (t50% RR) e para atingir uma resistência residual nula (t0% RR).

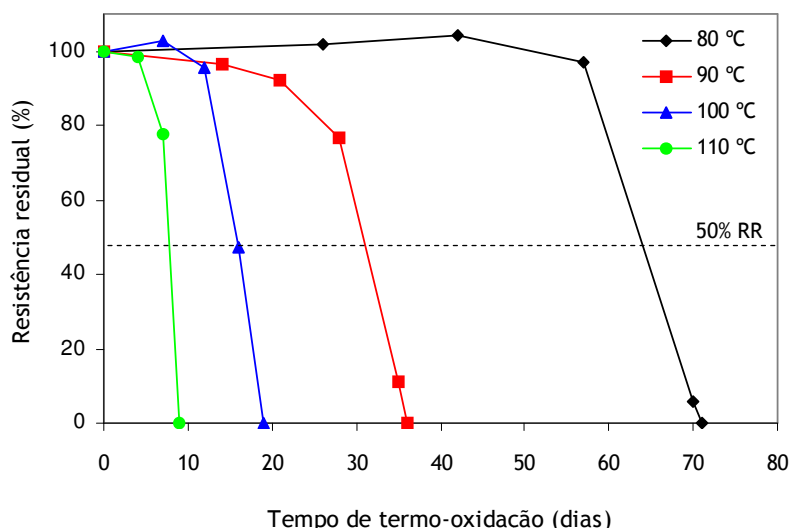


Figura 7.19 - Evolução da resistência residual do geotêxtil B0-280 durante os ensaios de termo-oxidação a diferentes temperaturas. (50% RR - 50% de resistência residual)

Quadro 7.31 - Efeito da temperatura no t50% RR e no t0% RR do geotêxtil B0-280.

| Temperatura (°C) | t50% RR (dias) | t0% RR (dias) |
|------------------|----------------|---------------|
| 80               | 64             | 71            |
| 90               | 31             | 36            |
| 100              | 16             | 19            |
| 110              | 8              | 9             |

A evolução da resistência residual, a diferentes temperaturas, mostra que o perfil de degradação do geotêxtil B0-280 possui um período (período de indução) em que a resistência à tracção do material não sofre alterações muito significativas (cerca de 57 dias a 80 °C, 21 dias a 90 °C, 12 dias a 100 °C e 4 dias a 110 °C). Após o período de indução, a degradação do geotêxtil B0-280 ocorreu rapidamente.

O tempo necessário para a resistência residual do geotêxtil B0-280 atingir os 50% é um parâmetro relativamente importante, pois a perda de 50% de resistência é um critério de rejeição muitas vezes usado no dimensionamento de geossintéticos. O t50% RR possui um valor de 64 dias a 80 °C, 31 dias a 90 °C, 16 dias a 100 °C e 8 dias a 110 °C. O tempo compreendido entre o t50% RR e o t0% RR foi muito pequeno (7 dias a 80 °C, 5 dias a 90 °C, 3 dias a 100 °C e apenas 1 dia a 110 °C).

#### 7.3.3.6 - Aplicação do modelo de Arrhenius na previsão do tempo de vida do geotêxtil B0-280

A resistência do geotêxtil B0-280 à oxidação a temperaturas próximas da temperatura ambiente não pode ser determinada experimentalmente em tempo útil (a baixas temperaturas, a oxidação do PP ocorre muito lentamente). No entanto, os resultados obtidos nos ensaios de degradação acelerados (realizados a temperaturas elevadas) podem ser usados para estimar o tempo de vida do geotêxtil B0-280 a temperaturas consideravelmente mais baixas.

A resistência do geotêxtil B0-280 à oxidação a temperaturas próximas da temperatura ambiente foi estimada através do modelo de Arrhenius. A equação de Arrhenius é a seguinte:

$$K = A e^{-E_a/RT} \quad (7.1)$$

em que,  $K$  é a constante de velocidade da reacção,  $A$  é o factor pré-exponencial,  $E_a$  é a energia de activação,  $R$  é a constante dos gases ideais e  $T$  é a temperatura (expressa em Kelvin).

Deste modo, a equação de Arrhenius relaciona a constante de velocidade de uma reacção química, a energia de activação (energia mínima necessária para que a reacção ocorra) e a temperatura. A aplicação de logaritmos naturais a ambos os termos da equação de Arrhenius origina:

$$\ln K = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (7.2)$$

Em várias reacções químicas, a representação de  $(\ln K)$  em função de  $(1/T)$  origina uma linha recta, em que a ordenada na origem corresponde ao  $(\ln A)$  e o declive a  $(-E_a/R)$ . Assim, se tivermos valores experimentais da velocidade de degradação (como por exemplo, o tempo necessário para a perda de 50% da resistência à tracção inicial ou o tempo necessário para a degradação total dos materiais) obtidos a diferentes temperaturas, podemos determinar, pelo menos teoricamente, a velocidade de degradação a qualquer temperatura de interesse. A realização deste tipo de estimativas requer um número mínimo de 2 valores experimentais da velocidade de degradação, determinados a diferentes temperaturas. No entanto, a exactidão destas previsões aumenta consideravelmente quando estão disponíveis mais resultados experimentais.

O modelo de Arrhenius foi aplicado aos resultados experimentais de  $t_{50\%}$  RR e de  $t_{0\%}$  RR obtidos nos ensaios de termo-oxidação do geotêxtil B0-280 às diferentes temperaturas. O logaritmo natural do inverso do tempo,  $[\ln (1/t_{50\%} \text{ RR})]$  ou  $[\ln (1/t_{0\%} \text{ RR})]$ , foi representado em função do inverso da temperatura. Os valores de  $t_{50\%}$  RR e de  $t_{0\%}$  RR a baixas temperaturas (0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C e 40 °C) foram estimados por extrapolação a partir das equações das curvas obtidas.

A Figura 7.20 ilustra a representação do  $[\ln (1/t_{50\%} \text{ RR})]$  em função de  $(1/T)$ . Os dados utilizados na representação anterior encontram-se resumidos no Quadro 7.32.

Quadro 7.32 - Parâmetros usados na representação de  $[\ln (1/t_{50\%} \text{ RR})]$  em função de  $(1/T)$ .

| Temperatura<br>(°C) | T<br>(K)* | $10^3 (1/T)$<br>(K <sup>-1</sup> ) | $t_{50\%}$ RR<br>(dias) | $\ln$<br>[1/ $t_{50\%}$ RR] |
|---------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 80                  | 353,15    | 2,832                              | 64                      | - 4,159                     |
| 90                  | 363,15    | 2,754                              | 31                      | - 3,434                     |
| 100                 | 373,15    | 2,680                              | 16                      | - 2,773                     |
| 110                 | 383,15    | 2,610                              | 8                       | - 2,079                     |

(\* T (K) = T (°C) + 273,15)

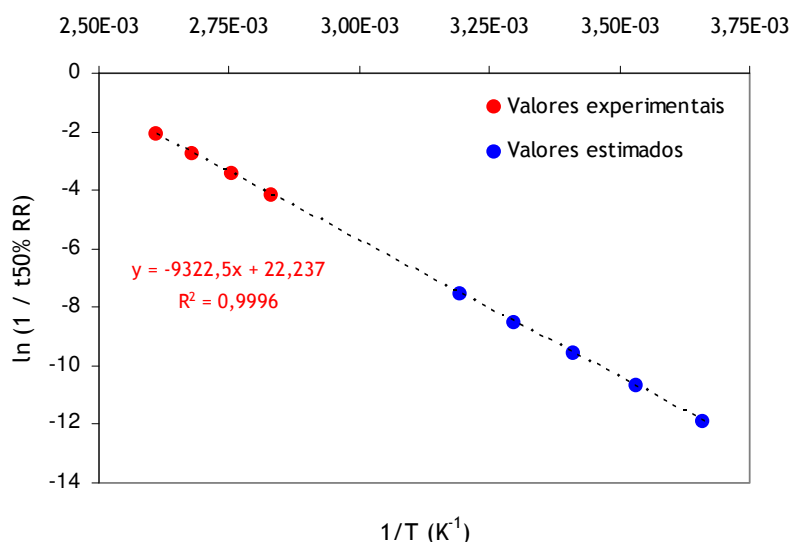


Figura 7.20 - Representação de Arrhenius usada para estimar o  $t_{50\% RR}$  do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.

O  $[\ln(1/t_{50\% RR})]$  variou linearmente com a temperatura ( $r^2 = 0,9996$ ). Assim, através dos dados experimentais obtidos a temperaturas elevadas foi possível, por extrapolação, estimar o  $t_{50\% RR}$  do geotêxtil B0-280 a temperaturas próximas da temperatura ambiente (Quadro 7.33).

Quadro 7.33 - Previsão do  $t_{50\% RR}$  do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.

| Temperatura<br>(°C) | T<br>(K) | $10^3 (1/T)$<br>( $K^{-1}$ ) | $\ln$<br>[ $1/t_{50\% RR}$ ] | $t_{50\% RR}$<br>(dias) | $t_{50\% RR}$<br>(anos) |
|---------------------|----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0                   | 273,15   | 3,661                        | - 11,893                     | 146239                  | 400,4                   |
| 10                  | 283,15   | 3,532                        | - 10,690                     | 43915                   | 120,2                   |
| 20                  | 293,15   | 3,411                        | - 9,562                      | 14214                   | 38,9                    |
| 30                  | 303,15   | 3,299                        | - 8,518                      | 5004                    | 13,7                    |
| 40                  | 313,15   | 3,193                        | - 7,530                      | 1863                    | 5,1                     |

A análise do Quadro 7.33 mostra que, a 20 °C, serão necessários cerca de 39 anos para a resistência à tracção do geotêxtil B0-280 sofrer uma redução de 50%. A 10 °C, serão necessários cerca de 120 anos, aproximadamente 3 vezes mais do que o tempo necessário a 20 °C e quase 9 vezes mais do que o tempo necessário a 30 °C (cerca de 14 anos).

As previsões efectuadas mostram que durabilidade do geotêxtil B0-280 é altamente dependente da temperatura. Um ligeiro aumento da temperatura resulta numa diminuição drástica da durabilidade do geotêxtil B0-280. De facto, a 10 °C, serão necessários cerca de mais 80 anos do que a 20 °C, para a resistência à tracção do geotêxtil B0-280 se reduzir para metade. Deste modo, a temperatura do meio no qual os geotêxteis se encontram inseridos poderá ter uma influência muito grande na sua durabilidade.

O Quadro 7.34 resume os dados utilizados para a representação de  $[\ln(1/t_{50\% RR})]$  em função de  $(1/T)$ . A respectiva representação gráfica encontra-se ilustrada na Figura 7.21.

Quadro 7.34 - Parâmetros usados na representação de  $[\ln (1/t0\% \text{ RR})]$  em função de  $(1/T)$ .

| Temperatura<br>(° C) | T<br>(K) | $10^3 (1/T)$<br>(K <sup>-1</sup> ) | t0% RR<br>(dias) | ln<br>[1/t0% RR] |
|----------------------|----------|------------------------------------|------------------|------------------|
| 80                   | 353,15   | 2,832                              | 71               | - 4,263          |
| 90                   | 363,15   | 2,754                              | 36               | - 3,584          |
| 100                  | 373,15   | 2,680                              | 19               | - 2,944          |
| 110                  | 383,15   | 2,610                              | 9                | - 2,197          |

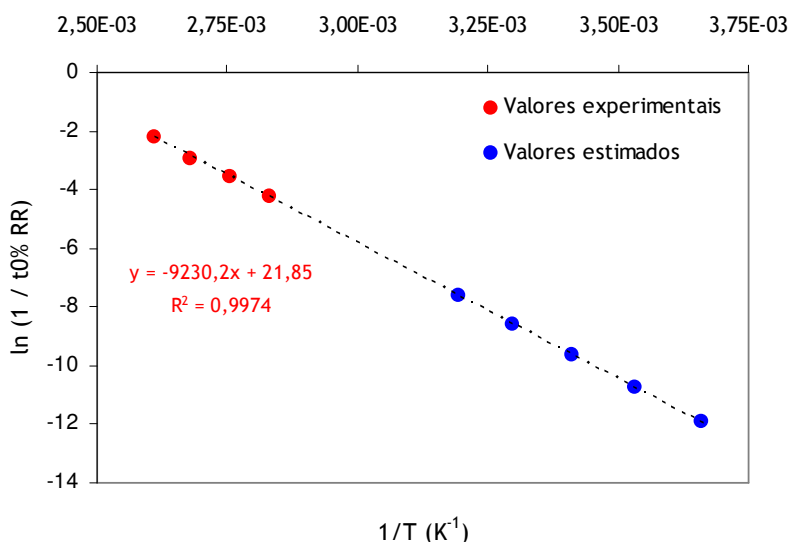


Figura 7.21 - Representação de Arrhenius usada para estimar o t0% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.

O  $[\ln (1/t0\% \text{ RR})]$  também variou linearmente com a temperatura ( $r^2 = 0,9974$ ). A partir da equação da curva ( $y = -9230,2x + 21,85$ ) foi extrapolado o tempo necessário para a degradação completa do geotêxtil B0-280 a temperaturas próximas da temperatura ambiente (Quadro 7.35).

Quadro 7.35 - Previsão do t0% RR do geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.

| Temperatura<br>(° C) | T<br>(K) | $10^3 (1/T)$<br>(K <sup>-1</sup> ) | ln<br>[1/t0% RR] | t0% RR<br>(dias) | t0% RR<br>(anos) |
|----------------------|----------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0                    | 273,15   | 3,661                              | - 11,942         | 153584           | 420,5            |
| 10                   | 283,15   | 3,532                              | - 10,751         | 46677            | 127,8            |
| 20                   | 293,15   | 3,411                              | - 9,634          | 15275            | 41,8             |
| 30                   | 303,15   | 3,299                              | - 8,600          | 5432             | 14,9             |
| 40                   | 313,15   | 3,193                              | - 7,622          | 2043             | 5,6              |

A 20 °C, serão precisos cerca de 42 anos para a degradação completa do geotêxtil B0-280 (apenas 3 anos depois de atingir o t50% RR). A 10 °C, o tempo necessário para a degradação total do material sobe para aproximadamente 128 anos, cerca do triplo do tempo necessário a 20 °C e quase 9 vezes mais do que o tempo necessário a 30 °C (aproximadamente 15 anos).

O intervalo de tempo compreendido entre o t50% RR e o t0% RR é relativamente pequeno. De facto, a 10 °C, o geotêxtil B0-280 apresenta um t50% RR de cerca de 120 anos e um t0% RR de cerca de 128 anos (apenas 8 anos desde que a resistência residual é de 50% até o material estar completamente degradado). À medida que a temperatura aumenta a diferença entre o t50% RR e o t0% RR é cada vez menor. A Figura 7.22 compara os valores estimados de t50% RR e de t0% RR do geotêxtil B0-280, entre os 0 °C e os 40 °C.

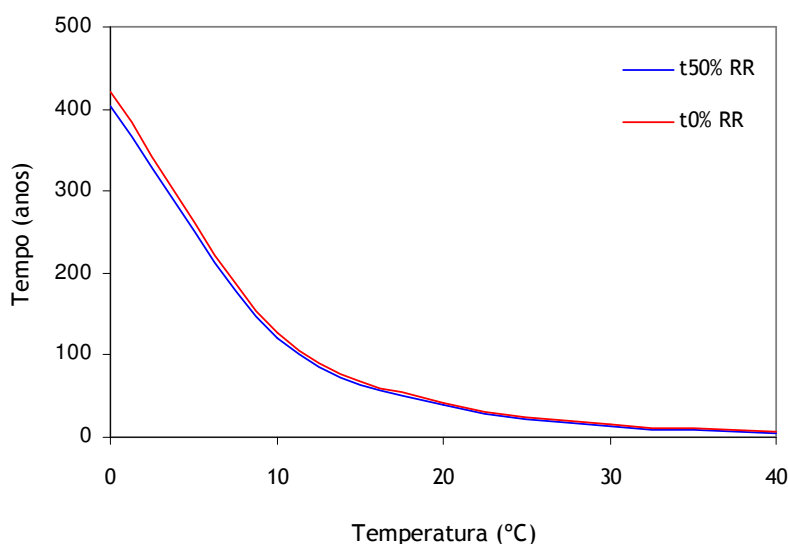


Figura 7.22 - Comparação do t50% RR e do t0% RR estimados para o geotêxtil B0-280 a baixas temperaturas.

Relembrando que, à temperatura de 110 °C, foram necessários 304 dias para a resistência residual do geotêxtil B2-280 atingir os 52,6%, então, é possível prever que, à temperatura ambiente, serão necessárias centenas de anos para a resistência residual do geotêxtil B2-280 atingir os 50%. Assim, a incorporação de uma pequena quantidade de C944 (0,2%) praticamente garante que a degradação dos geotêxteis causada apenas pela termo-oxidação não será um problema durante o tempo de vida útil da estrutura onde os materiais estão inseridos.

No entanto, é necessário notar que as previsões anteriormente realizadas apenas estão a considerar a degradação (por oxidação) induzida pela temperatura. Além disso, as estimativas efectuadas estão a assumir que o mecanismo de oxidação não sofre alterações com a variação da temperatura (uma alteração no mecanismo de oxidação originaria extrapolações inexactas).

Nas suas mais variadas aplicações, os geotêxteis irão estar expostos a outros agentes de degradação para além da termo-oxidação, os quais também irão contribuir para a degradação total sofrida pelos materiais. Assim, o tempo de vida dos geotêxteis será inferior aos tempos anteriormente estimados. A degradação sofrida pelos geotêxteis pode ainda ser maior no caso de ocorrerem efeitos sinérgicos entre os vários agentes de degradação.

A avaliação da existência de efeitos sinérgicos entre a oxidação induzida pela temperatura e outros possíveis agentes de degradação será avaliada nos pontos seguintes (pontos 7.3.4 e 7.3.5).

### 7.3.4 - Efeito da imersão em líquidos na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

#### 7.3.4.1 - Considerações iniciais

Os danos sofridos pelos geotêxteis na exposição sucessiva a dois ou a mais agentes de degradação podem não ser iguais à soma dos danos provocados por cada um dos agentes isoladamente. Deste modo, dois agentes que só por si não provocam degradação, podem, em conjunto, provocar sérios danos nos materiais. Uma vez que os geotêxteis dificilmente estarão apenas sujeitos à acção de um agente de degradação, é muito importante avaliar a existência de efeitos sinérgicos entre os vários agentes.

A existência de efeitos sinérgicos na degradação sofrida pelo geotêxtil B2-280 foi avaliada através da sua exposição sucessiva a dois agentes degradação: a imersão em líquidos e a termo-oxidação (dois agentes que isoladamente não lhe causaram danos significativos). Assim, procurou-se avaliar qual o efeito da imersão em líquidos na resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação induzida pela temperatura.

O geotêxtil B2-280 foi imerso, à temperatura ambiente, em água desionizada, em ácido sulfúrico, em ácido nítrico e em hidróxido de sódio. As condições experimentais dos vários ensaios de imersão estão resumidas no Quadro 7.36. As principais características dos reagentes utilizados nos ensaios de imersão encontram-se no Quadro 6.2 (Capítulo 6).

Quadro 7.36 - Ensaios de imersão em líquidos do geotêxtil B2-280, antes da exposição à termo-oxidação.

| Ensaio de imersão  | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|--------------------|---|---------------------|
| Água               | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7)  | ≈ 20 °C, 150 dias   |
| Ácido sulfúrico    | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1) | ≈ 20 °C, 150 dias   |
| Ácido nítrico      | HNO <sub>3</sub> (0,01 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)              | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Hidróxido de sódio | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13)                          | ≈ 20 °C, 150 dias   |

O tempo de imersão foi de 150 dias para as imersões em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio e de apenas 100 dias para a imersão em ácido nítrico. As condições experimentais usadas na imersão em ácido nítrico (pH ≈ 2) devem-se ao facto de, no ponto seguinte (ponto 7.3.5), este ácido ter sido usado para acidular as soluções de cationes metálicos onde os materiais foram imersos (o pH destas soluções foi ajustado para pH 2 pela adição de ácido nítrico). Assim, foi necessário avaliar qual o efeito da imersão em ácido nítrico na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação.

Os ensaios de imersão (cerca de 20 L de solução) foram efectuados em bacias vulgares (a parte de cima das bacias foi coberta com plástico negro, de modo a proteger o geotêxtil B2-280 da acção da luz). Os provetes imersos possuíam 200 mm de largura e 300 mm de comprimento, de modo a terem as dimensões exigidas para os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319.



Após a imersão, os provetes não foram lavados (de modo a ficarem contaminados com alguns restos das soluções de imersão) e foram secos, por um período mínimo de 7 dias, em local seco e ao abrigo da luz. Em seguida, os provetes foram expostos à termo-oxidação, a 110 °C, durante 14, 28, 42 e 56 dias (ensaios idênticos aos apresentados no ponto 7.3.1).

#### 7.3.4.2 - Resistência do geotêxtil B2-280 à imersão em líquidos

O aspecto global do geotêxtil B2-280 não sofreu alterações durante as imersões em água, em ácido sulfúrico, em ácido nítrico e em hidróxido de sódio. Os valores obtidos para a resistência à tracção, para a extensão na força máxima e para a resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão, estão resumidos no Quadro 7.37. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual encontram-se no Quadro 7.38. A Figura 7.23 ilustra as curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, obtidas antes e após os ensaios de imersão.

Quadro 7.37 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão.

| Ensaio de imersão              | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto                        | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| H <sub>2</sub> O               | 13,1 (8,9%)                                 | 126 (6,6%)                   | <b>100</b>               |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 13,1 (9,9%)                                 | 110 (10%)                    | <b>100</b>               |
| HNO <sub>3</sub>               | 13,4 (5,2%)                                 | 123 (9,1%)                   | <b>102</b>               |
| NaOH                           | 13,7 (10%)                                  | 123 (7,9%)                   | <b>105</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.38 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão.

| Ensaio de imersão              | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|--------------------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto                        | 6,9                                       | 9,2                                       | 10,5                                       | 11,7                                       | 976                            | ---                   |
| H <sub>2</sub> O               | 4,0                                       | 6,4                                       | 9,4  | 12,1                                       | 955                            | <b>97,8</b>           |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 8,6                                       | 10,9                                      | 13,0                                       | 15,4                                       | 952                            | <b>97,5</b>           |
| HNO <sub>3</sub>               | 4,7                                       | 7,5                                       | 10,8                                       | 13,5                                       | 1034                           | <b>106</b>            |
| NaOH                           | 6,2                                       | 8,7                                       | 11,4                                       | 13,8                                       | 1207                           | <b>124</b>            |

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 não sofreu alterações significativas após os vários ensaios de imersão (resistências residuais entre os 100% e os 105%). A extensão na força máxima, a rigidez secante e a robustez do geotêxtil B2-280 sofreram algumas variações sem grande significado. De um modo geral, o geotêxtil B2-280 apresentou uma boa resistência aos vários ensaios de imersão.

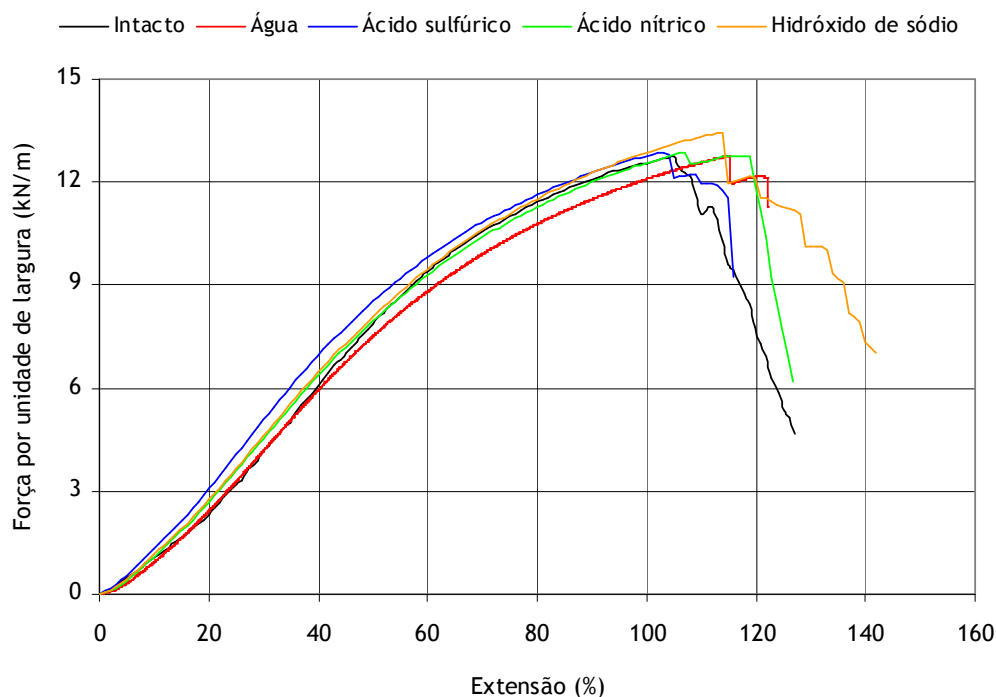


Figura 7.23 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão.

#### 7.3.4.3 - Efeito da imersão em água na resistência à termo-oxidação

O Quadro 7.39 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 7.40. As curvas médias força-extensão são apresentadas na Figura 7.24.

Os resultados obtidos nos ensaios de termo-oxidação dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em água foram muito idênticos aos resultados obtidos para os provetes sem imersão prévia (resultados apresentados no ponto 7.3.1.3). Assim, a imersão prévia em água (durante 150 dias e à temperatura ambiente) não originou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação.

Quadro 7.39 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                   | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 13,1 (8,6%)                                  | 88,9 (7,8%)                  | 100                      |
| 28 Dias | 13,0 (14%)                                   | 85,7 (5,9%)                  | 99,2                     |
| 42 Dias | 13,2 (7,5%)                                  | 82,8 (3,9%)                  | 101                      |
| 56 Dias | 13,0 (10%)                                   | 82,4 (4,2%)                  | 99,2                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.40 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                      |
| 14 Dias | 7,2  | 12,5   | 16,5  | 18,9  | 832                               | <b>85,2</b>              |
| 28 Dias | 7,4  | 12,7   | 16,6  | 19,1  | 782                               | <b>80,1</b>              |
| 42 Dias | 7,7  | 13,3   | 17,2  | 19,7  | 772                               | <b>79,1</b>              |
| 56 Dias | 7,8  | 13,2   | 17,0  | 19,5  | 759                               | <b>77,8</b>              |

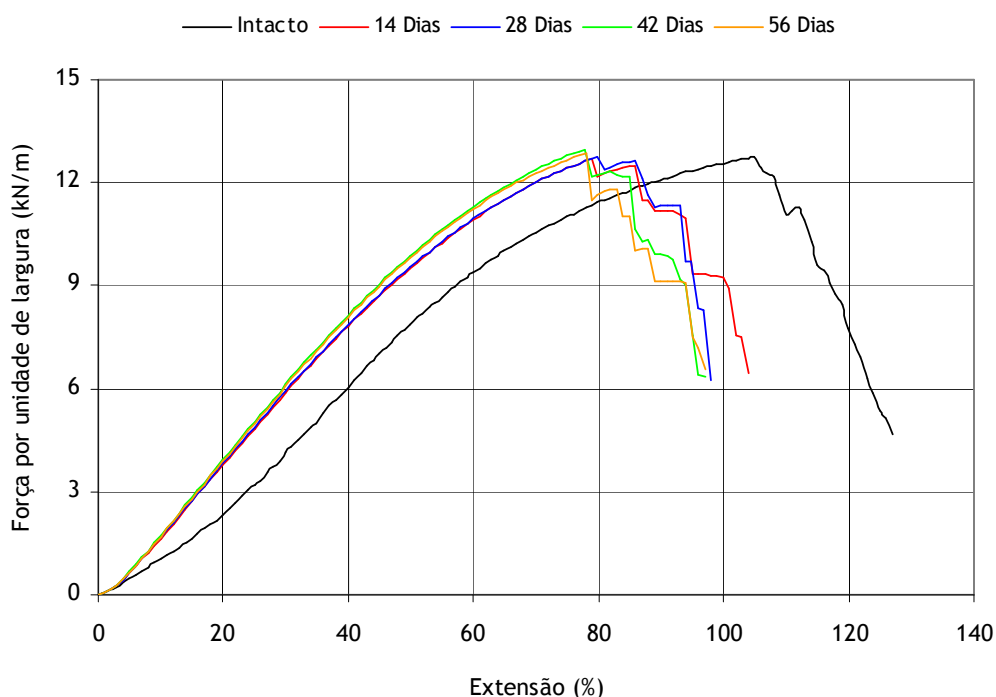


Figura 7.24 - Curvas médias força-estensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em água e de termo-oxidação a 110 °C.

#### 7.3.4.4 - Efeito da imersão em ácido sulfúrico na resistência à termo-oxidação

Os provetes do geotêxtil B2-280 previamente imersos em ácido sulfúrico (originalmente brancos) adquiriram uma cor castanha logo após 1 dia de termo-oxidação (até as próprias paredes do forno ficaram acastanhadas). A cor dos provetes do geotêxtil B2-280 manteve-se castanha durante os restantes dias de exposição a 110 °C (Figura 7.25). Para além da alteração de cor, os provetes não apresentaram outros sinais da existência de algum tipo de danos (tais como, a existência de fibras degradadas ou a libertação de compostos voláteis com odor a “plástico queimado”).

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidas no Quadro 7.41 e no Quadro 7.42. As curvas médias força-estensão estão ilustradas na Figura 7.26.



Figura 7.25 - Exposição sucessiva do geotêxtil B2-280 a ácido sulfúrico e à termo-oxidação: (a) forno após 1 dia de exposição a 110 °C; (b) geotêxtil B2-280 após 1 dia de exposição a 110 °C; (c) geotêxtil B2-280 após imersão em ácido sulfúrico (à esquerda) e após 56 dias a 110 °C (à direita).

Quadro 7.41 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                   | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 11,5 (17%)                                   | 80,3 (5,7%)                  | <b>87,8</b>              |
| 28 Dias | 11,2 (6,5%)                                  | 71,2 (7,4%)                  | <b>85,5</b>              |
| 42 Dias | 11,0 (12%)                                   | 65,6 (5,4%)                  | <b>84,0</b>              |
| 56 Dias | 10,2 (16%)                                   | 62,7 (9,7%)                  | <b>77,9</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção dos provetes imersos em ácido sulfúrico diminuiu à medida que o tempo de exposição à termo-oxidação aumentou. A rápida alteração na cor dos provetes (logo após 1 dia) poderia prognosticar a ocorrência de uma elevada degradação no geotêxtil B2-280 durante os ensaios de termo-oxidação, o que não se veio a confirmar. De facto, após 56 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 ainda possuía uma resistência residual relativamente elevada (77,9%).

Quadro 7.42 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                      |
| 14 Dias | 12,3   | 13,3   | 14,6  | 16,4  | 571                               | <b>58,5</b>              |
| 28 Dias | 13,4   | 14,8   | 16,3  | 18,3  | 521                               | <b>53,4</b>              |
| 42 Dias | 11,6   | 14,2   | 16,4  | 18,7  | 465                               | <b>47,6</b>              |
| 56 Dias | 13,3   | 14,6   | 15,8  | 17,7  | 403                               | <b>41,3</b>              |

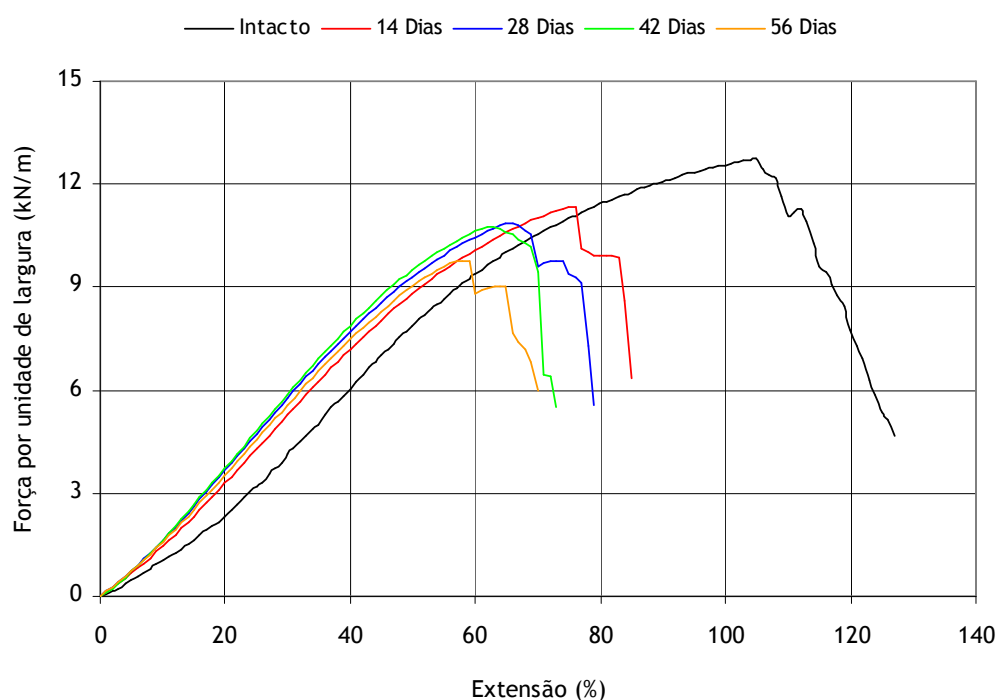


Figura 7.26 - Curvas médias força-estensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido sulfúrico e de termo-oxidação a 110 °C.

A extensão na força máxima dos provetes imersos em ácido sulfúrico também diminuiu à medida que o tempo de exposição à termo-oxidação aumentou: 80,3% após 14 dias, 62,7% ao fim de 56 dias. A diminuição ocorrida na robustez do geotêxtil B2-280 foi maior para os provetes imersos em ácido sulfúrico (robustez residual de 41,3% após 56 dias) do que para os provetes sem imersão (robustez residual de 71,6% ao fim de 56 dias).

A imersão do geotêxtil B2-280 em ácido sulfúrico provocou uma diminuição da sua resistência à termo-oxidação. Assim, dois agentes, que só por si não causaram danos significativos, provocaram em conjunto alguma degradação no material. Deste modo, foi possível comprovar a existência de efeitos sinérgicos na degradação sofrida pelo geotêxtil B2-280.

A observação por MEV do geotêxtil B2-280 após a imersão em ácido sulfúrico e posterior exposição à termo-oxidação a 110 °C mostrou a inexistência de danos microscópicos no material.

**7.3.4.5 - Efeito da imersão em ácido nítrico na resistência à termo-oxidação**

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação, encontram-se resumidas nos Quadros 7.43 e 7.44. A Figura 7.27 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas.

Quadro 7.43 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 13,1 (14%)                                  | 94,4 (9,9%)                  | <b>100</b>               |
| 28 Dias | 12,2 (8,0%)                                 | 89,6 (7,8%)                  | <b>93,1</b>              |
| 42 Dias | 12,4 (7,6%)                                 | 87,9 (6,1%)                  | <b>94,7</b>              |
| 56 Dias | 12,4 (10%)                                  | 91,5 (6,6%)                  | <b>94,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.44 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 6,9                                       | 9,2                                       | 10,5                                       | 11,7                                       | 976                            | ---                   |
| 14 Dias | 5,5                                       | 9,3                                       | 13,3                                       | 16,2                                       | 767                            | <b>78,6</b>           |
| 28 Dias | 5,1                                       | 8,7                                       | 12,4                                       | 15,2                                       | 684                            | <b>70,1</b>           |
| 42 Dias | 4,9                                       | 8,4                                       | 12,3                                       | 15,3                                       | 720                            | <b>73,8</b>           |
| 56 Dias | 4,9                                       | 8,3                                       | 12,1                                       | 15,0                                       | 757                            | <b>77,6</b>           |

Ao contrário do que aconteceu para os provetes imersos em ácido sulfúrico, os provetes imersos em ácido nítrico não sofreram grandes alterações de cor, nem da resistência à tracção, após exposição a 110 °C. De facto, ao fim de 56 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B2-280 imerso em ácido nítrico possuía uma resistência residual de 94,7% (os provetes sem imersão apresentavam uma resistência residual de 97,7% após os mesmos 56 dias de exposição).

A robustez residual do geotêxtil B2-280 após a termo-oxidação foi idêntica para os provetes imersos em ácido nítrico e para os provetes sem qualquer imersão. A imersão em ácido nítrico também não alterou significativamente a extensão na força máxima do geotêxtil B2-280 após a termo-oxidação.

Assim, e ao contrário da imersão em ácido sulfúrico, a imersão em ácido nítrico não provocou uma diminuição significativa da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação. No entanto, é essencial notar que a concentração de ácido sulfúrico era 10 vezes superior à concentração de ácido nítrico (além disso, o tempo de imersão em ácido sulfúrico também foi superior).

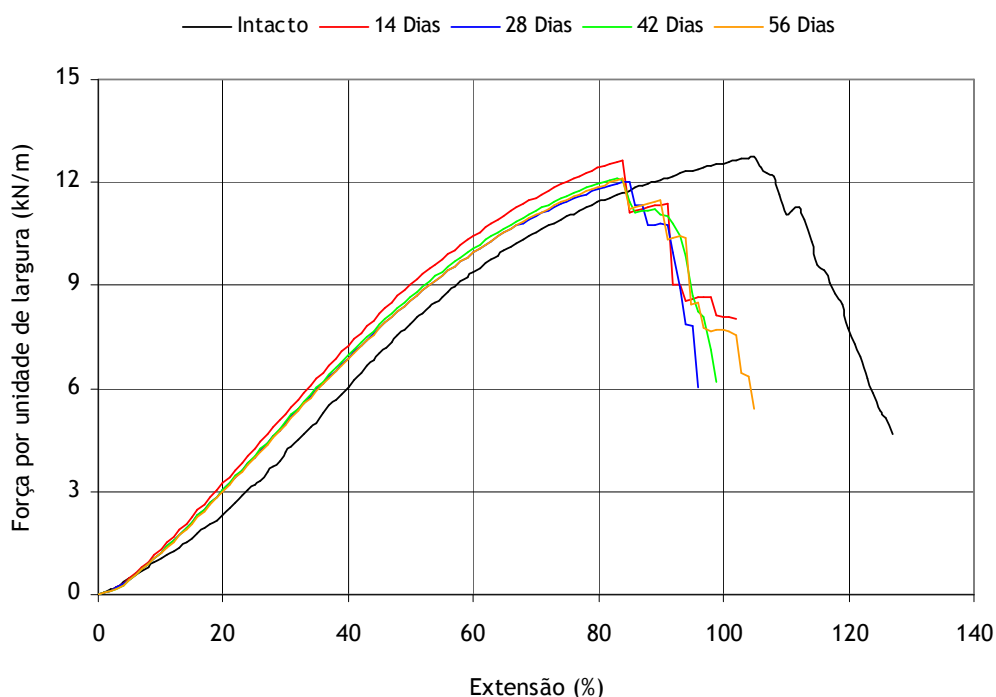


Figura 7.27 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em ácido nítrico e de termo-oxidação a 110 °C.

Tal como já foi referido anteriormente, o efeito da imersão em ácido nítrico (pH 2, 100 dias) na resistência à oxidação do geotêxtil B2-280 foi apenas estudado porque, no ponto 7.3.5, as soluções de cátions metálicos (sais de nitrato) onde os geotêxteis foram imersos (durante 100 dias) foram aciduladas a pH 2 precisamente com ácido nítrico. Assim, e dado que a imersão em ácido nítrico não provocou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação, as alterações que possam ocorrer na resistência dos materiais à oxidação serão apenas atribuíveis aos cátions metálicos.

#### 7.3.4.6 - Efeito da imersão em hidróxido de sódio na resistência à termo-oxidação

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidas nos Quadros 7.45 e 7.46. As curvas médias força-extensão estão representadas na Figura 7.28.

Quadro 7.45 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 12,3 (6,0%)                                 | 88,7 (4,7%)                  | 93,9                     |
| 28 Dias | 12,5 (11%)                                  | 84,6 (2,4%)                  | 95,4                     |
| 42 Dias | 12,2 (11%)                                  | 85,9 (4,2%)                  | 93,1                     |
| 56 Dias | 12,3 (7,8%)                                 | 89,2 (5,4%)                  | 93,9                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.46 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                      |
| 14 Dias | 6,2  | 9,3  | 12,6  | 15,2  | 732                               | <b>75,0</b>              |
| 28 Dias | 6,3  | 9,8  | 13,5  | 16,3  | 681                               | <b>69,8</b>              |
| 42 Dias | 6,3  | 9,7  | 13,2  | 15,9  | 683                               | <b>70,0</b>              |
| 56 Dias | 6,2  | 9,5  | 12,9  | 15,5  | 716                               | <b>73,4</b>              |

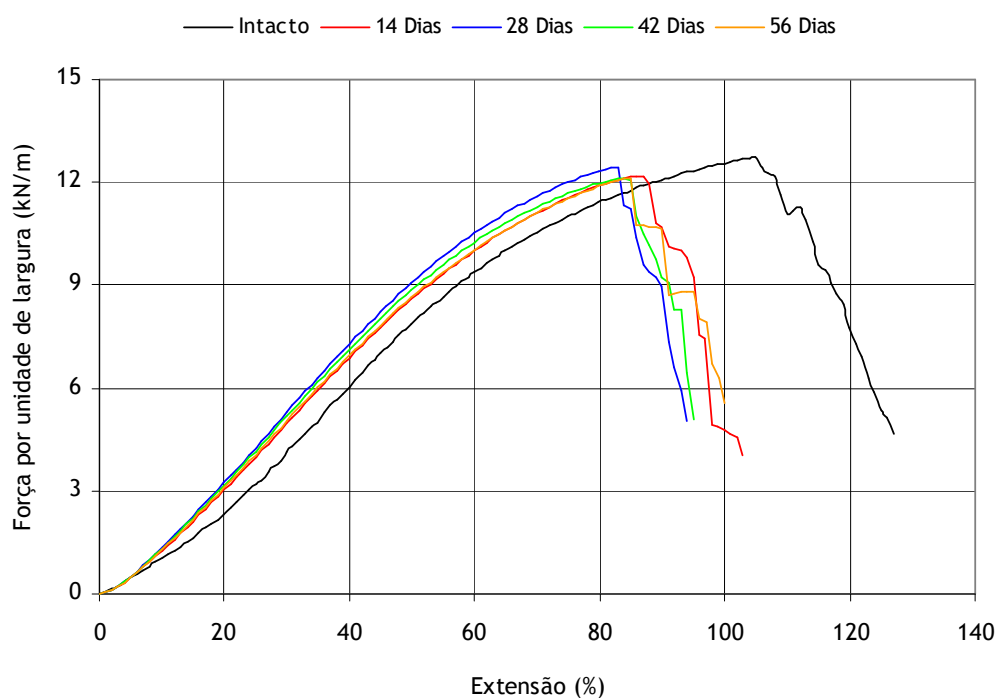


Figura 7.28 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em hidróxido de sódio e de termo-oxidação a 110 °C.

A cor dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em hidróxido de sódio não sofreu alterações muito significativas durante os ensaios de termo-oxidação (apenas um pequeno escurecimento semelhante ao que ocorreu nos provetes sem imersão). A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em hidróxido de sódio sofreu ligeiras variações após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C (resistências residuais entre os 93,1% e os 95,4%). As extensões na força máxima do geotêxtil B2-280 foram muito semelhantes para os provetes imersos em hidróxido de sódio e para os provetes sem imersão. Os valores da robustez também não apresentaram alterações muito relevantes em relação aos provetes sem imersão.

A imersão do geotêxtil B2-280 em hidróxido de sódio não provocou uma diminuição muito grande da sua resistência à termo-oxidação. Assim, em condições de imersão semelhantes, a imersão em ácido sulfúrico originou uma maior redução da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação do que a imersão em hidróxido de sódio.



#### 7.3.4.7 - Comparação do efeito das várias imersões na resistência à termo-oxidação

A resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação foi afectada pela imersão prévia do material em ácido sulfúrico ( $\text{pH} \approx 1$ , 150 dias à temperatura ambiente). Assim, dois agentes que individualmente não provocaram danos significativos no geotêxtil B2-280 podem, em conjunto, provocar alguma degradação. As imersões em água, ácido nítrico e hidróxido de sódio não causaram uma diminuição muito significativa da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação. A Figura 7.29 compara a evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provetes imersos e não imersos) durante os ensaios de termo-oxidação. A Figura 7.30 ilustra uma comparação similar para a robustez residual.

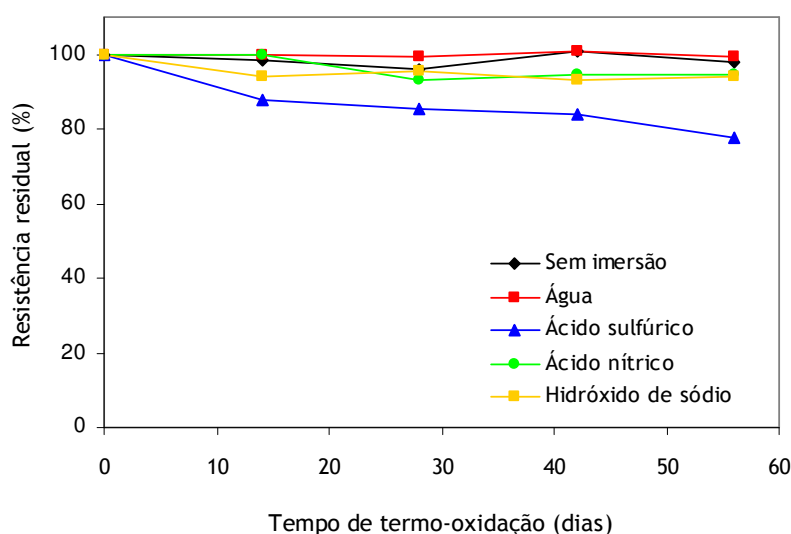


Figura 7.29 - Evolução da resistência residual dos provetes não imersos e dos provetes imersos do geotêxtil B2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

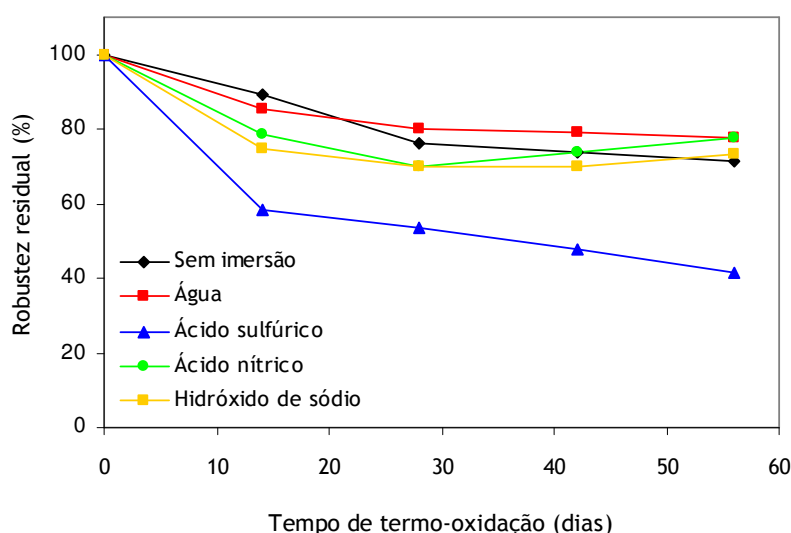


Figura 7.30 - Evolução da robustez residual dos provetes não imersos e dos provetes imersos do geotêxtil B2-280 ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

#### **7.3.4.8 - Considerações finais**

A diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação após a imersão em ácido sulfúrico poderá ter duas explicações possíveis: (1) a imersão em ácido sulfúrico promoveu a extracção e/ou consumo do aditivo C944 existente no material, desprotegendo-o contra a oxidação ou (2) os restos de ácido sulfúrico existentes no material actuaram como catalisadores do processo de oxidação. A alteração da cor dos provetes do geotêxtil B2-280 mostrou a existência de restos de ácido sulfúrico, que poderão ter agido como catalisadores do processo de oxidação. Além disso, é também possível que algum C944 tenha sido extraído e/ou consumido durante os 150 dias de imersão (embora o C944 possua uma boa resistência à extracção). Deste modo, é possível que ambos os processos tenham contribuído para a diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação.

As imersões em água, ácido nítrico e hidróxido de sódio não causaram uma diminuição significativa da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação, o que indica que a possível extracção e/ou consumo de C944 não ocorreu em grande escala e que os restos de ácido nítrico, de hidróxido de sódio ou de água existentes nos provetes não catalisaram o processo de oxidação.

#### **7.3.5 - Efeito dos catiões metálicos na resistência dos geotêxteis à termo-oxidação**

##### **7.3.5.1 - Considerações iniciais**

Neste ponto, procede-se à avaliação do efeito dos catiões metálicos (cádmio, cobre, ferro e zinco) na resistência dos geotêxteis à termo-oxidação. Para tal, os geotêxteis foram imersos em soluções de catiões metálicos e em seguida expostos à termo-oxidação.

O geotêxtil B2-280 foi imerso, à temperatura ambiente durante 100 dias, em soluções de nitrato de cádmio, nitrato de cobre, nitrato de ferro e nitrato de zinco (todas as soluções com concentração de 5 g.L<sup>-1</sup>). O geotêxtil B2-280 foi também imerso, à temperatura ambiente durante 100 dias, numa solução de nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> para avaliar o efeito do aumento da concentração da solução.

O geotêxtil B4-280 foi imerso, à temperatura ambiente durante 100 dias, numa solução de nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup>. Deste modo, foi possível avaliar qual o efeito do aumento da concentração de C944 na resistência dos geotêxteis à exposição sucessiva ao catião ferro e à termo-oxidação.

As soluções dos catiões metálicos foram aciduladas para pH 2 pela adição de ácido nítrico. O efeito da imersão em ácido nítrico (dentro das condições experimentais usadas) na resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação foi avaliado no ponto 7.3.4.5 (a imersão do geotêxtil B2-280 em ácido nítrico não provocou alterações significativas da sua resistência à oxidação). As condições experimentais dos ensaios de imersão em soluções de catiões metálicos encontram-se resumidas no Quadro 7.47.

Os ensaios de imersão (cerca de 20 L de solução) foram efectuados em bacias vulgares (a parte de cima das bacias foi tapada com plástico preto, de modo a proteger os materiais da acção da luz). Os provetes imersos possuíam 200 mm de largura e 300 mm de comprimento (dimensões compatíveis com os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 10319).

Quadro 7.47 - Ensaios de imersão em soluções de cátions metálicos antes da exposição à termo-oxidação.

| Ensaio de imersão                                | Agente de degradação   | Condições do ensaio |
|--|--|---------------------|
| Nitrato de cádmio (II) *                         | $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)**  | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de cobre (II) *                          | $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)**  | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de ferro (III) *                         | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)**  | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de zinco (II) *                          | $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)**  | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de ferro (III) *<br>(maior concentração) | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (10 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)** | ≈ 20 °C, 100 dias   |

(\*os estados de oxidação dos cátions metálicos serão omitidos no texto)

(\*\*pH ajustado para pH 2 pela adição de ácido nítrico)

(reagentes da marca Merck, qualidade: *pro analysis*)

Após a imersão, os provetes não foram lavados (de modo a ficarem contaminados com as soluções de cátions metálicos) e foram secos, por um período mínimo de 7 dias, em local seco e ao abrigo da luz. Em seguida, os provetes foram expostos à termo-oxidação, a 110 °C, durante 14, 28, 42 e 56 dias (ensaios idênticos aos apresentados no ponto 7.3.1).

#### 7.3.5.2 - Resistência do geotêxtil B2-280 à imersão em soluções de cátions metálicos

O aspecto global do geotêxtil B2-280 não sofreu alterações após as imersões em nitrato de cádmio, em nitrato de cobre e em nitrato de zinco. No entanto, após a imersão em nitrato de ferro, a cor do geotêxtil B2-280 ficou amarela e/ou laranja, o que indicou a existência de restos de nitrato de ferro a contaminar o material (Figura 7.31).

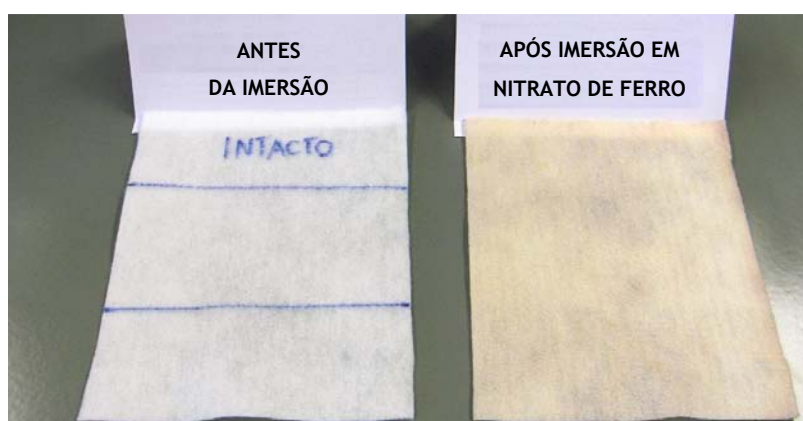


Figura 7.31 - Aspecto do geotêxtil B2-280 antes (à esquerda) e após a imersão em nitrato de ferro (à direita).

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos, encontram-se nos Quadros 7.48 e 7.49. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão, estão ilustradas na Figura 7.32.

Quadro 7.48 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão nas soluções dos catiões metálicos.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 13,1 (11%)                                   | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| Nitrato de cádmio | 13,2 (13%)                                   | 114 (3,6%)                   | <b>101</b>               |
| Nitrato de cobre  | 13,1 (8,2%)                                  | 121 (8,1%)                   | <b>100</b>               |
| Nitrato de ferro  | 13,0 (7,8%)                                  | 111 (4,8%)                   | <b>99,2</b>              |
| Nitrato de zinco  | 13,0 (5,6%)                                  | 126 (5,5%)                   | <b>99,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.49 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios de imersão nas soluções dos catiões metálicos.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 6,9   | 9,2   | 10,5   | 11,7   | 976                             | ---                   |
| Nitrato de cádmio | 3,8   | 6,2   | 9,4  | 12,5   | 1055                            | <b>108</b>            |
| Nitrato de cobre  | 4,0   | 6,4   | 9,6  | 12,6   | 984                             | <b>101</b>            |
| Nitrato de ferro  | 6,6   | 9,5   | 13,0   | 15,7   | 1001                            | <b>103</b>            |
| Nitrato de zinco  | 3,6   | 5,6   | 8,7  | 11,6   | 1001                            | <b>103</b>            |

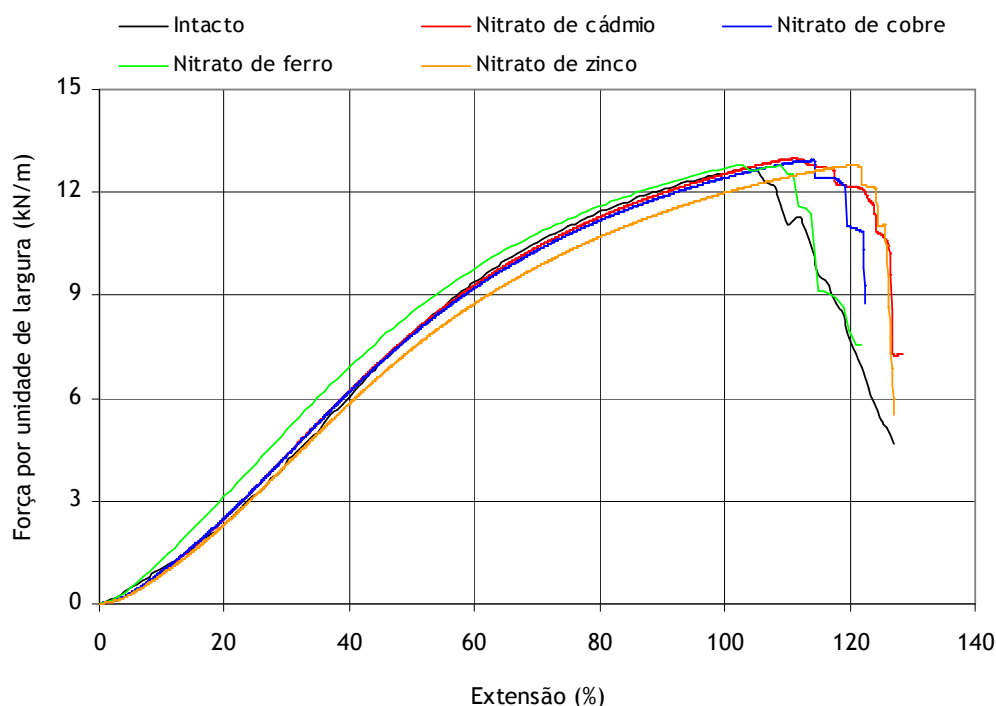


Figura 7.32 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários ensaios de imersão nas soluções dos catiões metálicos.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 não sofreu alterações significativas após a imersão nas soluções dos cátions metálicos (resistências residuais entre os 99,2% e os 101%); do mesmo modo, a imersão nas soluções dos cátions metálicos também não causou grandes alterações na extensão na força máxima e na robustez do material. Assim, o geotêxtil B2-280 apresentou uma boa resistência à imersão nas soluções dos cátions metálicos.

A imersão do geotêxtil B2-280 nas várias soluções de cátions metálicos poderá, hipoteticamente, ter provocado a perda de C944 (por difusão ou por lixiviação), e assim ter desprotegido o material nos subsequentes ensaios de oxidação. No entanto, é improvável que tenha ocorrido uma perda muito grande de C944 durante os ensaios de imersão (não existem indícios que a imersão em ácido nítrico tenha provocado uma perda de C944 e não existem motivos para presumir que a presença adicional dos cátions metálicos possa originar uma perda do aditivo).

Assim, admitindo que a imersão nas soluções de cátions metálicos não originou uma perda muito grande de C944, e sabendo que os restos de ácido nítrico não agem como catalisadores do processo de oxidação, então, qualquer diminuição que possa ocorrer na resistência à oxidação do geotêxtil B2-280 será devida à acção catalisadora dos cátions metálicos no processo de oxidação.

### 7.3.5.3 - Efeito do catião cádmio na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

O Quadro 7.50 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual podem ser encontrados no Quadro 7.51. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios, estão representadas na Figura 7.33.

Quadro 7.50 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 12,4 (6,5%)                                 | 93,3 (3,5%)                  | <b>94,7</b>              |
| 28 Dias | 12,0 (7,7%)                                 | 84,2 (3,4%)                  | <b>91,6</b>              |
| 42 Dias | 12,3 (12%)                                  | 91,5 (6,6%)                  | <b>93,9</b>              |
| 56 Dias | 12,1 (9,1%)                                 | 88,1 (9,2%)                  | <b>92,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção dos provetes imersos em nitrato de cádmio sofreu ligeiras variações após os ensaios de termo-oxidação a 110 °C (resistências residuais entre os 91,6% e os 94,7%). No entanto, as variações ocorridas depois da imersão em nitrato de cádmio foram muito semelhantes às variações ocorridas após a imersão em ácido nítrico (resistências residuais entre os 93,1% e os 100%).

Quadro 7.51 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                               | ---                      |
| 14 Dias | 5,3  | 7,6  | 11,1  | 14,1  | 665                               | <b>68,1</b>              |
| 28 Dias | 5,1  | 7,9  | 11,5  | 14,5  | 622                               | <b>63,7</b>              |
| 42 Dias | 4,7  | 7,6  | 11,1  | 14,2  | 680                               | <b>69,7</b>              |
| 56 Dias | 5,4  | 8,3  | 11,9  | 15,0  | 645                               | <b>66,1</b>              |

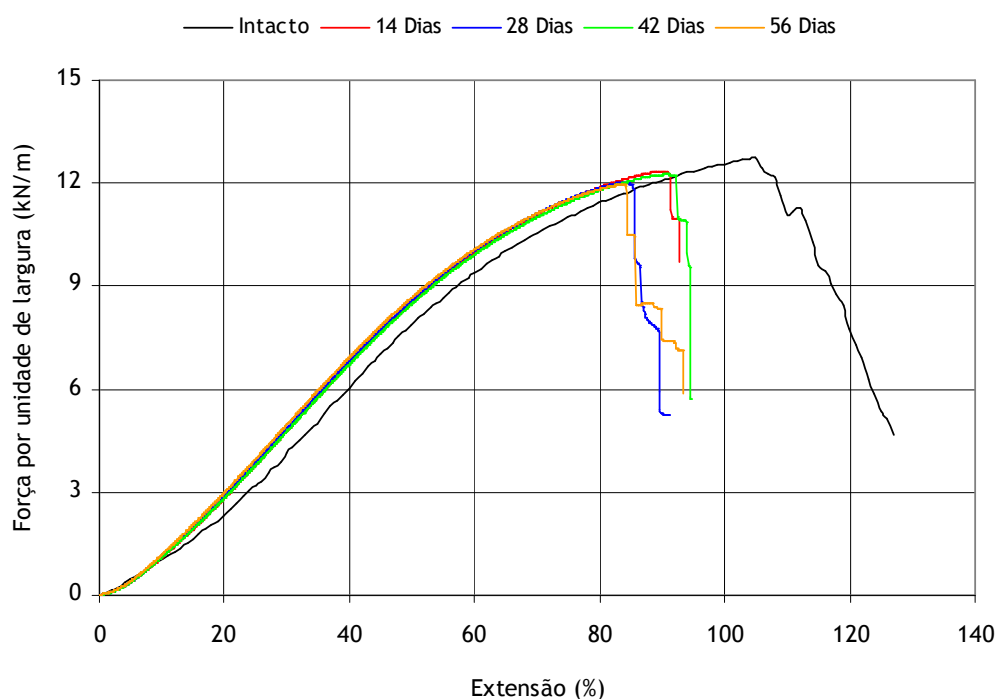


Figura 7.33 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de cádmio e de termo-oxidação a 110 °C.

As extensões na força máxima do geotêxtil B2-280 após os ensaios de termo-oxidação foram muito idênticas para os provetes imersos em nitrato de cádmio, em ácido nítrico e para os provetes sem imersão. A robustez residual do geotêxtil B2-280 depois dos ensaios de termo-oxidação foi menor para os provetes imersos em nitrato de cádmio (entre os 63,7% e os 69,7%) do que para os provetes imersos em ácido nítrico (entre os 70,1% e os 78,6%) e do que para os provetes sem imersão (entre os 71,6% e os 89,4%).

Assim, a imersão em nitrato de cádmio poderá ter causado uma ligeira diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação. No entanto, a proximidade dos resultados experimentais obtidos (quando comparados os provetes sem imersão, os provetes imersos em ácido nítrico e os provetes imersos em nitrato de cádmio) não permite determinar com exactidão qual o efeito da imersão em nitrato de cádmio na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação.

#### 7.3.5.4 - Efeito do catião cobre na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

Os provetes imersos em nitrato de cobre não resistiram aos ensaios de termo-oxidação. Após 14 dias de exposição, os provetes estavam amarelos e podiam ser facilmente transformados em pequenos pedaços ou em pó (alguns provetes rasgaram durante o ensaio de termo-oxidação) (Figura 7.34). O processo de degradação foi acompanhado pela libertação de compostos voláteis com um odor a “plástico queimado”.



Figura 7.34 - Aspecto dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) vista global do forno; (b) degradação sofrida por alguns provetes.

Os 14 dias de exposição a 110 °C provocaram a liquidificação de alguns provetes do geotêxtil B2-280 previamente imersos em nitrato de cobre. De facto, foram encontrados alguns resíduos líquidos no fundo do forno (líquido amarelo bastante viscoso) (Figura 7.35).



Figura 7.35 - Aspecto de alguns provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre após 14 dias de termo-oxidação a 110 °C: (a) provede degradado e líquido amarelo; (b) líquido amarelo.

A diminuição da temperatura do forno para operações de limpeza originou a solidificação do líquido amarelo encontrado (Figura 7.36). A observação do resíduo sólido por MEV mostrou que este possuía várias fibras aprisionadas na sua estrutura (Figura 7.37). A análise por raio X mostrou que o resíduo sólido possuía uma composição idêntica à composição das fibras do geotêxtil B2-280 (para além do carbono, não foi identificado mais nenhum elemento químico na composição do resíduo sólido).



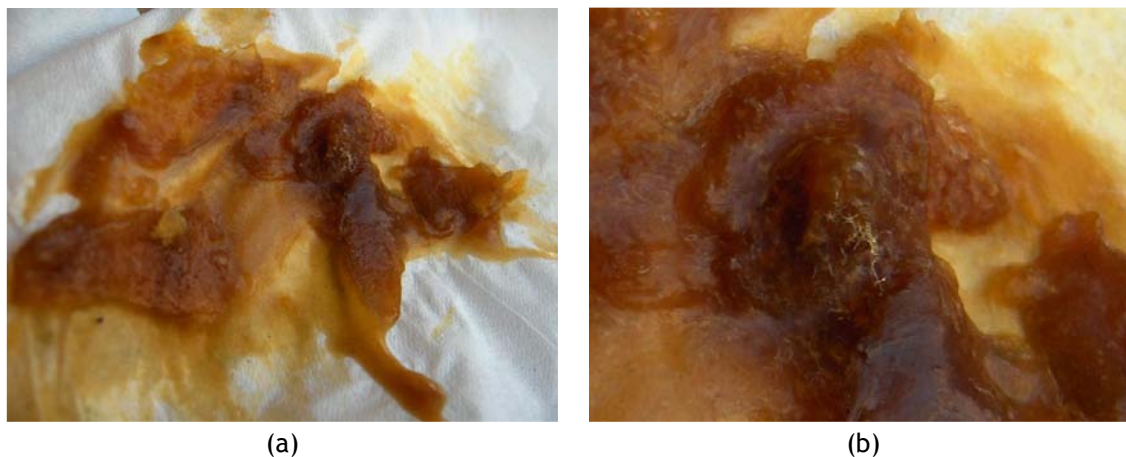


Figura 7.36 - Resíduo solidificado após a diminuição da temperatura do forno:  
(a) aspecto geral do resíduo sólido; (b) fibras aprisionadas no resíduo sólido.

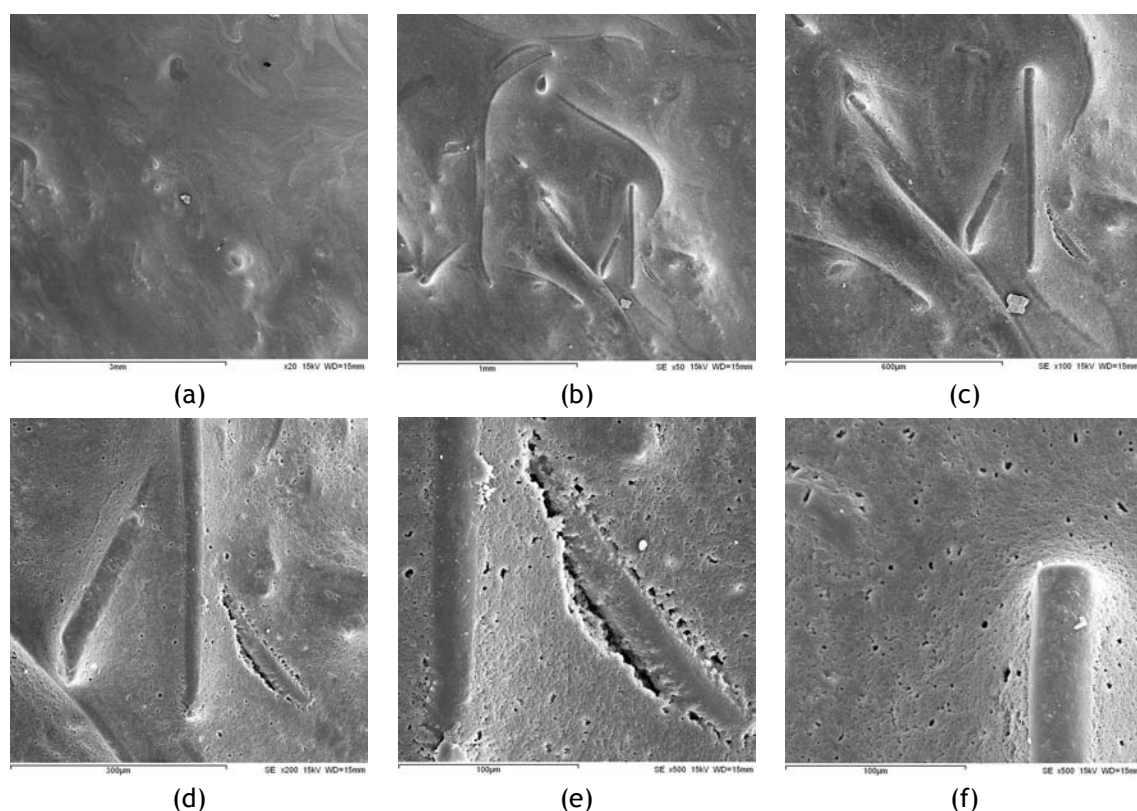


Figura 7.37 - Imagens obtidas por MEV do resíduo sólido formado nos ensaios de termo-oxidação dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de cobre:  
(a) x20; (b) x50; (c) x100; (d) x200; (e) x500; (f) x500.

A imersão em nitrato de cobre provocou uma diminuição drástica da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação. De facto, após 14 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 estava completamente degradado (resistência à tracção nula). Na ausência da imersão prévia em nitrato de cobre, seriam necessários, pelo menos, 701 dias para a degradação completa do material (valor estimado no ponto 7.3.2.2). Assim, o processo de oxidação do geotêxtil B2-280 foi altamente acelerado pela presença de restos de nitrato de cobre no material.



### 7.3.5.5 - Efeito do catião ferro na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

Ao contrário dos provetes imersos em nitrato de cobre, os provetes imersos em nitrato de ferro não foram completamente destruídos durante os ensaios de termo-oxidação. A cor amarela e/ou laranja que os provetes do geotêxtil B2-280 adquiriram durante a imersão em nitrato de ferro não sofreu alterações muito significativas durante os ensaios de termo-oxidação.

O Quadro 7.52 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C. Os valores obtidos para a rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 7.53. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios, estão ilustradas na Figura 7.38.

Quadro 7.52 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 11,3 (7,4%)                                 | 73,4 (6,2%)                  | <b>86,3</b>              |
| 28 Dias | 7,34 (11%)                                  | 51,5 (10%)                   | <b>56,0</b>              |
| 42 Dias | 5,34 (15%)                                  | 39,3 (11%)                   | <b>40,8</b>              |
| 56 Dias | 4,22 (16%)                                  | 33,9 (6,3%)                  | <b>32,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.53 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 6,9                                       | 9,2                                       | 10,5                                       | 11,7                                       | 976                            | ---                   |
| 14 Dias | 6,3                                       | 10,4                                      | 14,7                                       | 17,7                                       | 528                            | <b>54,1</b>           |
| 28 Dias | 5,0                                       | 8,9                                       | 13,2                                       | 15,8                                       | 291                            | <b>29,8</b>           |
| 42 Dias | 5,8                                       | 10,2                                      | 14,8                                       | 16,4                                       | 153                            | <b>15,7</b>           |
| 56 Dias | 5,1                                       | 9,5                                       | 13,9                                       | 15,1                                       | 116                            | <b>11,9</b>           |

A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de ferro sofreu uma diminuição significativa após os ensaios de termo-oxidação (ao contrário do que aconteceu para os provetes sem imersão). Ao fim de 14 dias de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de ferro apresentavam uma resistência residual de 86,3%; a resistência à tracção dos provetes imersos em nitrato de ferro diminuiu com o aumento do tempo de exposição à termo-oxidação (resistências residuais de 56,0% após 28 dias, 40,8% ao fim de 42 dias e 32,2% após 56 dias).

A extensão na força máxima dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de ferro também diminuiu à medida que o tempo de exposição à termo-oxidação aumentou (extensões de 73,4% após

14 dias, 51,5% após 28 dias, 39,3% após 42 dias e 33,9% após 56 dias). As extensões na força máxima dos provetes imersos em nitrato de ferro foram inferiores às dos provetes sem imersão; ao fim de 56 dias de exposição, os provetes imersos em nitrato de ferro possuíam uma extensão na força máxima de 33,9%, enquanto que os provetes sem imersão apresentavam uma extensão na força máxima de 83,4%.

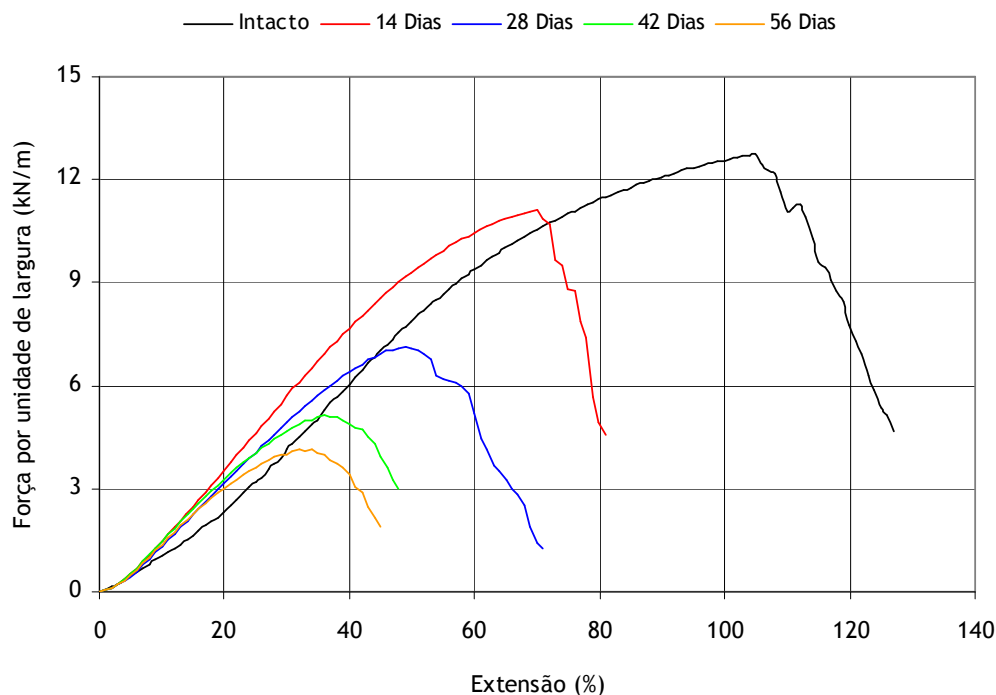


Figura 7.38 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

A imersão em nitrato de ferro originou uma diminuição significativa da robustez do geotêxtil B2-280 após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 14 dias de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de ferro possuíam uma robustez residual de 54,1% (robustez residual de 89,4% nos provetes sem imersão). O aumento do tempo de termo-oxidação provocou uma diminuição da robustez dos provetes imersos em nitrato de ferro. De facto, após 56 dias a 110°C, os provetes imersos em nitrato de ferro apresentavam uma robustez residual de apenas 11,9% (71,6% nos provetes não imersos).

A imersão em nitrato de ferro provocou um aumento muito considerável da velocidade do processo de oxidação do geotêxtil B2-280. De facto, ao fim de 56 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B2-280 possuía uma resistência residual de 32,2%, uma extensão na força máxima de 33,9% e uma robustez residual de 11,9%; na ausência de imersão, e após 304 dias de exposição a 110 °C, o geotêxtil B2-280 apresentava uma resistência residual de 52,7%, uma extensão na força máxima de 57,6% e uma robustez residual de 27,6%.

A velocidade do processo de oxidação do geotêxtil B2-280 na presença do catião ferro foi inferior à velocidade do processo de oxidação na presença do catião cobre (degradação total em 14 dias), mas superior à velocidade do processo de oxidação na presença do catião cádmio.

### 7.3.5.6 - Efeito do catião zinco na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

À semelhança dos provetes imersos em nitrato de cádmio e em nitrato de ferro, os provetes imersos em nitrato de zinco também não foram destruídos durante os ensaios de termo-oxidação. Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C, estão resumidos no Quadro 7.54. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual encontram-se no Quadro 7.55. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios, estão representadas na Figura 7.39.

Quadro 7.54 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 8,52 (15%)                                  | 66,1 (9,4%)                  | <b>65,0</b>              |
| 28 Dias | 9,16 (6,7%)                                 | 62,8 (7,1%)                  | <b>69,9</b>              |
| 42 Dias | 8,32 (14%)                                  | 59,7 (18%)                   | <b>63,5</b>              |
| 56 Dias | 7,50 (11%)                                  | 57,1 (12%)                   | <b>57,3</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.55 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 6,9                                       | 9,2                                       | 10,5                                       | 11,7                                       | 976                            | ---                   |
| 14 Dias | 4,4                                       | 6,6                                       | 9,8  | 12,5                                       | 278                            | <b>28,5</b>           |
| 28 Dias | 5,2                                       | 7,9                                       | 11,3                                       | 14,5                                       | 372                            | <b>38,1</b>           |
| 42 Dias | 4,7                                       | 7,4                                       | 10,9                                       | 14,0                                       | 230                            | <b>23,6</b>           |
| 56 Dias | 3,7                                       | 6,1                                       | 9,8  | 13,1                                       | 223                            | <b>22,8</b>           |

A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de zinco diminuiu após os ensaios de termo-oxidação (diminuição inferior à diminuição observada após a imersão em nitrato de ferro). Ao fim de 56 dias de termo-oxidação, os provetes imersos em nitrato de zinco possuíam uma resistência residual de 57,3% (resistências residuais de 92,4% depois da imersão em nitrato de cádmio e de 32,2% após a imersão em nitrato de ferro).

A extensão na força máxima dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de zinco também diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 56 dias de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de zinco possuíam uma extensão na força máxima de 57,1% (extensões na força máxima de 83,4% nos provetes sem imersão, de 88,1% nos provetes imersos em nitrato de cádmio e de 33,9% nos provetes imersos em nitrato de ferro).

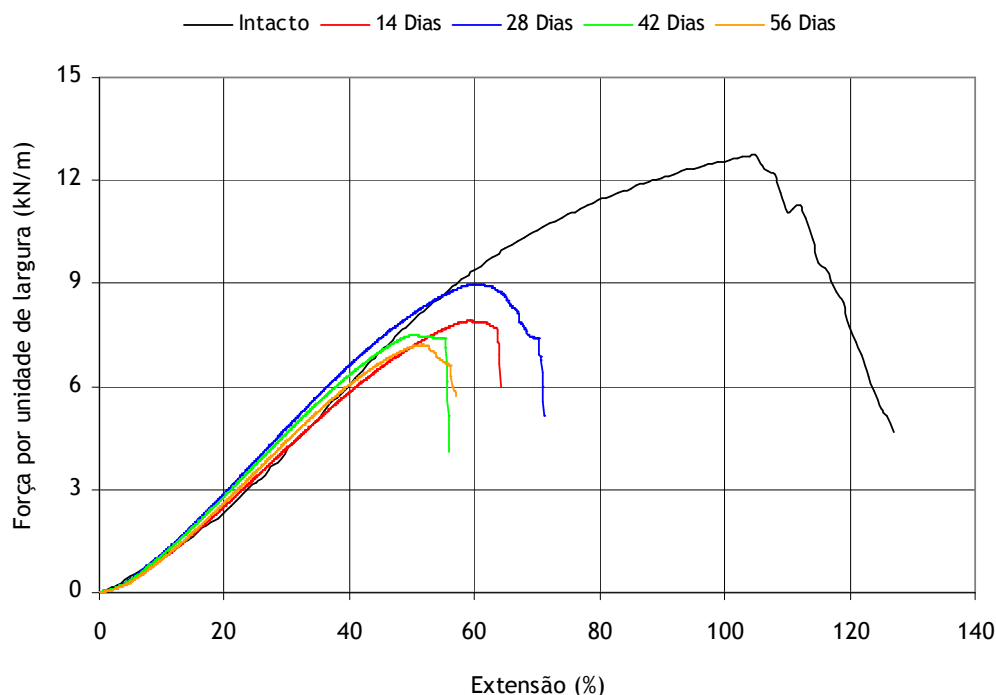


Figura 7.39 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de zinco e de termo-oxidação a 110 °C.

A imersão em nitrato de zinco originou uma redução da robustez do geotêxtil B2-280 após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim dos 56 dias totais de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de zinco apresentavam uma robustez residual de 22,8% (robustez residual de 71,6% nos provetes não imersos).

A imersão em nitrato de zinco também originou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação. Assim, e à semelhança do catião cobre e do catião ferro, o catião zinco também possui um efeito catalisador no processo de oxidação dos geotêxteis de PP.

#### 7.3.5.7 - Comparação do efeito dos vários catiões metálicos na resistência à termo-oxidação

A resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação diminuiu pela imersão do material em nitrato de cobre, nitrato de ferro e nitrato de zinco. Deste modo, agentes que individualmente não provocaram danos no geotêxtil B2-280 causaram, em conjunto, uma elevada degradação no material. A imersão em nitrato de cádmio não causou uma diminuição muito significativa da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação.

A imersão do geotêxtil B2-280 nas soluções dos catiões metálicos não provocou danos no material, mas originou a sua contaminação com os catiões cádmio, cobre, ferro e zinco (a contaminação com ferro foi visível pela alteração da cor do material). A diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação poderá assim ser explicada pela acção catalisadora dos catiões metálicos no processo de oxidação. A diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação também poderia ser explicada pela ocorrência de uma grande perda de C944 durante os ensaios de imersão. No entanto, e como já foi referido anteriormente, esta hipótese é improvável (o C944 apresenta uma elevada resistência à

extracção e as imersões em ácido nítrico e em nitrato de cádmio não originaram uma diminuição muito significativa da resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação).

A Figura 7.40 compara a evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em nitrato de cádmio, em nitrato de cobre, em nitrato de ferro e em nitrato de zinco) durante os ensaios de termo-oxidação. A Figura 7.41 ilustra uma comparação idêntica para a robustez residual.

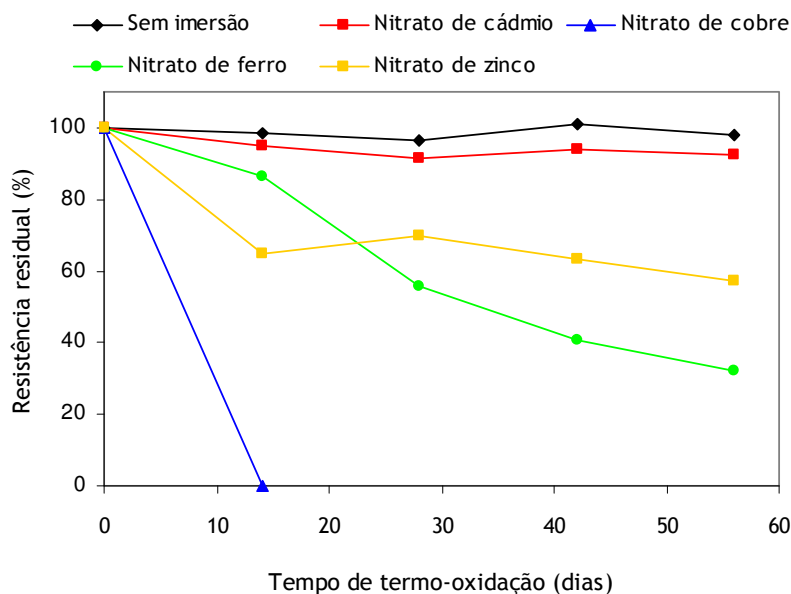


Figura 7.40 - Evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provete não imerso e provetes imersos em soluções de cátions metálicos) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

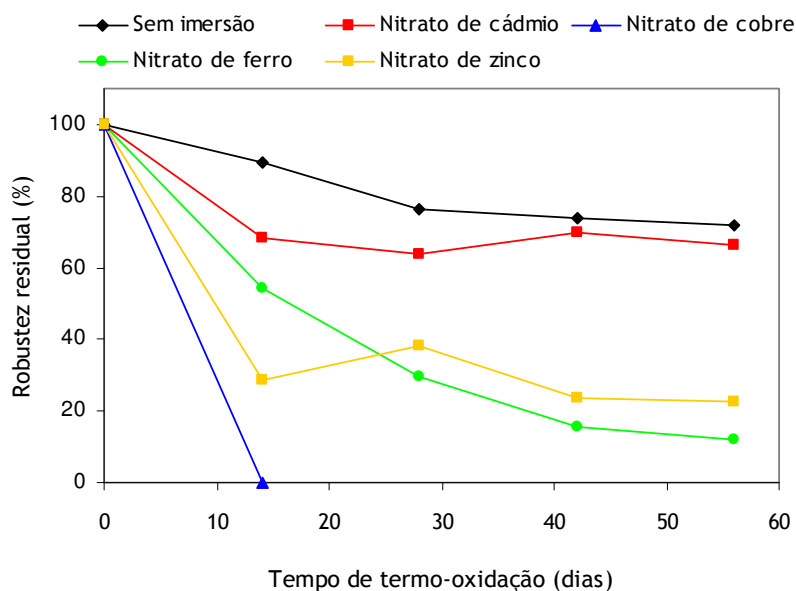


Figura 7.41 - Evolução da robustez residual do geotêxtil B2-280 (provete não imerso e provetes imersos em soluções de cátions metálicos) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

A presença de catiões metálicos pode reduzir drasticamente a resistência dos geotêxteis à oxidação induzida pela temperatura. De facto, os catiões metálicos cobre, ferro e zinco podem actuar como catalisadores do processo de oxidação dos geotêxteis de PP. A aceleração do processo de oxidação foi mais pronunciada nos provetes contaminados com cobre, seguindo-se os provetes contaminados com ferro e, por último, os provetes contaminados com zinco. A aceleração do processo de oxidação nos provetes contaminados com cádmio não foi muito pronunciada.

É interessante notar que o tempo necessário (14 dias) para a degradação completa dos provetes do geotêxtil B2-280 (material com 0,2% de C944) contaminados com cobre foi semelhante ao tempo necessário (9 dias) para a degradação total do geotêxtil B0-280 (material sem C944). Assim, o C944 não conseguiu retardar significativamente a oxidação do geotêxtil B2-280 catalisada pelo cobre.

O tempo de vida dos geotêxteis expostos a condições termo-oxidativas pode ser significativamente reduzido pela presença de alguns catiões metálicos. Assim, é necessário considerar os efeitos entre os vários agentes de degradação para poder estimar, com maior exactidão, o tempo de vida útil dos geotêxteis nas suas mais variadas aplicações.

#### 7.3.5.8 - Efeito da concentração de ferro na resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação

A resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação diminuiu pela imersão do material em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup>. O aumento da concentração da solução de imersão de 5 g.L<sup>-1</sup> para 10 g.L<sup>-1</sup> teve por objectivo originar uma maior contaminação do geotêxtil B2-280 com nitrato de ferro. Tal como na imersão em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup>, os provetes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> também adquiriram uma cor amarela e/ou laranja. As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280 não sofreram alterações após a imersão do material em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup>.

O Quadro 7.56 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> e de termo-oxidação a 110 °C. Os valores obtidos para a rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se no Quadro 7.57. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios, estão ilustradas na Figura 7.42.

Quadro 7.56 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,1 (11%)                                  | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 5,19 (15%)                                  | 44,6 (7,5%)                  | <b>39,6</b>              |
| 28 Dias | 4,74 (8,1%)                                 | 43,9 (9,5%)                  | <b>36,2</b>              |
| 42 Dias | 2,83 (9,0%)                                 | 35,4 (2,0%)                  | <b>21,6</b>              |
| 56 Dias | 2,79 (9,2%)                                 | 32,0 (7,7%)                  | <b>21,3</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.57 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  e de termo-oxidação a  $110^\circ \text{C}$ .

| Tempo   | $J_{\text{SEC}} 2\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|------------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                                | ---                      |
| 14 Dias | 4,5  | 7,7  | 11,5  | 13,8  | 157                                | <b>16,1</b>              |
| 28 Dias | 4,0  | 6,9  | 10,3  | 12,4  | 139                                | <b>14,2</b>              |
| 42 Dias | 3,6  | 6,2  | 9,4   | 10,1  | 74,4                               | <b>7,6</b>               |
| 56 Dias | 4,6  | 7,9  | 10,8  | 11,0  | 73,8                               | <b>7,6</b>               |

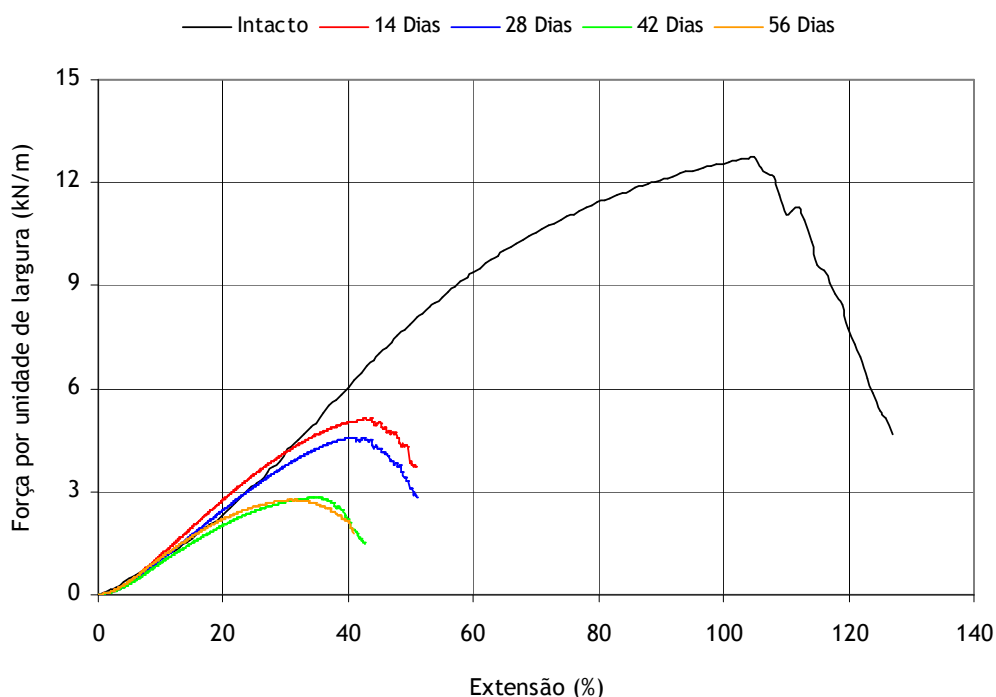


Figura 7.42 - Curvas médias força-estensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  e de termo-oxidação a  $110^\circ \text{C}$ .

A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  sofreu uma grande diminuição após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 14 dias de exposição a  $110^\circ \text{C}$ , os provetes imersos em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  apresentavam uma resistência residual de 39,6%. O aumento do tempo de termo-oxidação provocou uma redução da resistência à tracção dos provetes imersos em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  (resistências residuais de 36,2% após 28 dias, 21,6% após 42 dias e de 21,3% após 56 dias).

O aumento da concentração de nitrato de ferro de  $5 \text{ g.L}^{-1}$  para  $10 \text{ g.L}^{-1}$  provocou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-280 à termo-oxidação. De facto, os provetes imersos em nitrato de ferro  $10 \text{ g.L}^{-1}$  possuíam, após os ensaios de termo-oxidação, resistências à tracção inferiores aos provetes imersos em nitrato de ferro  $5 \text{ g.L}^{-1}$  (Figura 7.43).

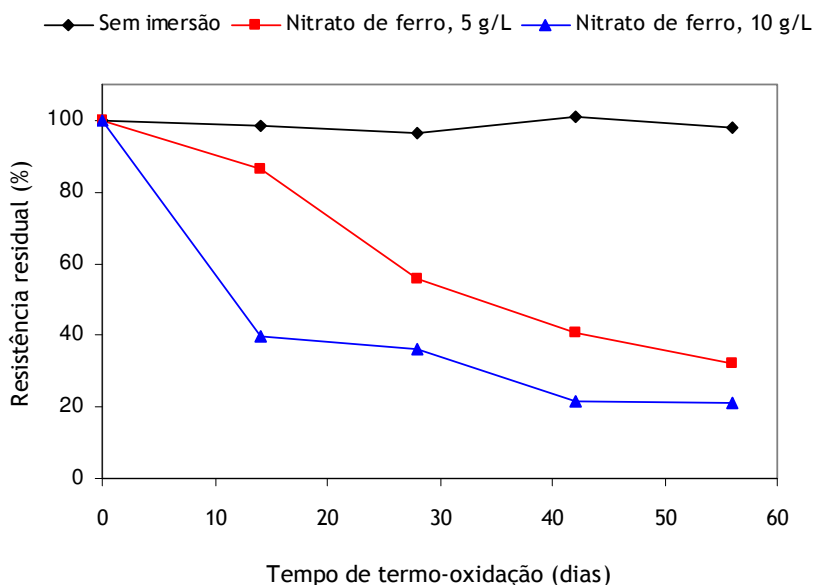


Figura 7.43 - Evolução da resistência residual do geotêxtil B2-280 (provêtes não imersos e provêtes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> e 10 g.L<sup>-1</sup>) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

A extensão na força máxima dos provêtes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> também diminuiu depois dos ensaios de termo-oxidação. As extensões na força máxima dos provêtes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> foram inferiores às dos provêtes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup>. De facto, após 14 dias de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía extensões na força máxima de 44,6% (para os provêtes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup>) e de 73,4% (para os provêtes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup>). Ao fim de 56 dias de exposição a 110 °C, os provêtes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> apresentavam uma extensão na força máxima de 32,0%, enquanto que os provêtes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> possuíam uma extensão na força máxima de 33,9%.

A robustez dos provêtes do geotêxtil B2-280 imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> sofreu uma grande diminuição após os ensaios de termo-oxidação. De facto, ao fim de 14 dias de exposição a 110 °C, os provêtes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> possuíam uma robustez residual de apenas 16,1%. O aumento do tempo de termo-oxidação originou uma redução da robustez dos provêtes imersos em nitrato de ferro 10 g.L<sup>-1</sup> (ao fim dos 56 dias de exposição, robustez residual de 7,6%). A Figura 7.44 compara a evolução da robustez residual do geotêxtil B2-280 durante os ensaios de termo-oxidação (provêtes não imersos e provêtes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> e 10 g.L<sup>-1</sup>).

Tal como observado para a resistência à tracção, o aumento da concentração de nitrato de ferro de 5 g.L<sup>-1</sup> para 10 g.L<sup>-1</sup> provocou uma maior diminuição da robustez do geotêxtil B2-280 após os ensaios de termo-oxidação. Assim, o aumento da concentração de nitrato de ferro resultou numa menor resistência do geotêxtil B2-280 à oxidação induzida pela temperatura.

A velocidade do processo de oxidação do geotêxtil B2-280 (catalisado pelo catião ferro) parece ser dependente da quantidade de catião existente (partindo do pressuposto que a imersão na solução mais concentrada de nitrato de ferro provocou uma maior contaminação do material com o catião ferro). Assim, o processo de oxidação dos geotêxteis de PP poderá ser acelerado pelo aumento da concentração dos cátions metálicos.



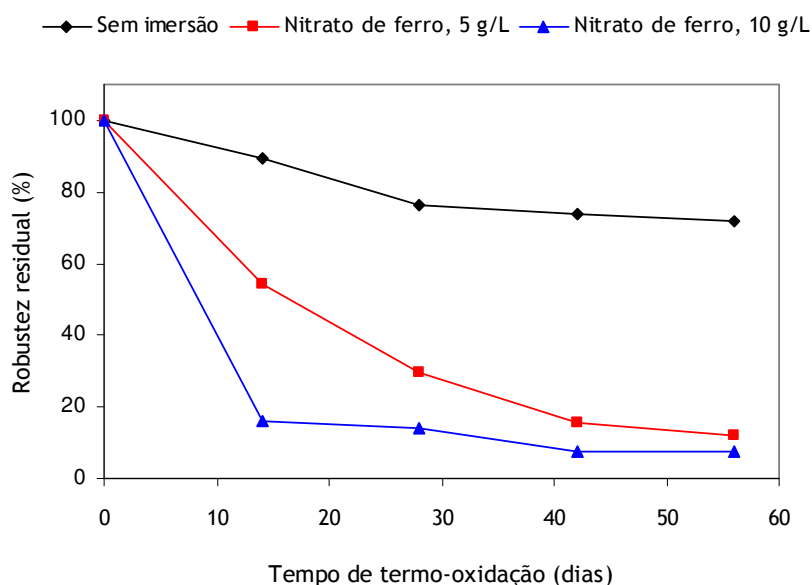


Figura 7.44 - Evolução da robustez residual do geotêxtil B2-280 (provetes não imersos e provetes imersos em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> e 10 g.L<sup>-1</sup>) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

#### 7.3.5.9 - Efeito do catião ferro na resistência do geotêxtil B4-280 à termo-oxidação

Tal como o geotêxtil B2-280 (com 0,2% de C944), o geotêxtil B4-280 (com 0,4% de C944) também foi imerso numa solução de nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> e, em seguida, sujeito a ensaios de termo-oxidação. Assim, procurou-se avaliar o efeito do aditivo C944 na velocidade de oxidação dos geotêxteis de PP, na presença do catião ferro.

A imersão do geotêxtil B4-280 numa solução de nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> também originou a alteração da cor do material (de branca para amarela e/ou laranja). As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-280 não sofreram alterações significativas ao fim dos 100 dias de imersão em nitrato de ferro.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro 5 g.L<sup>-1</sup> e termo-oxidação a 110 °C, encontram-se resumidas nos Quadros 7.58 e 7.59. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios, estão ilustradas na Figura 7.45.

Quadro 7.58 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 14,0 (6,2%)                                 | 113 (7,8%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 12,2 (4,5%)                                 | 65,0 (3,5%)                  | 87,1                     |
| 28 Dias | 11,8 (4,7%)                                 | 56,0 (8,2%)                  | 84,3                     |
| 42 Dias | 11,5 (13%)                                  | 56,1 (8,1%)                  | 82,1                     |
| 56 Dias | 9,97 (11%)                                  | 43,3 (12%)                   | 71,2                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 7.59 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 15,7   | 15,4   | 15,1  | 16,1  | 1135                              | ---                      |
| 14 Dias | 9,5  | 16,2   | 21,2  | 25,1  | 511                               | <b>45,0</b>              |
| 28 Dias | 10,6   | 17,5   | 22,7  | 26,2  | 420                               | <b>37,0</b>              |
| 42 Dias | 10,5   | 16,9   | 22,1  | 25,7  | 396                               | <b>34,9</b>              |
| 56 Dias | 11,6   | 18,9   | 24,6  | 27,5  | 270                               | <b>23,8</b>              |

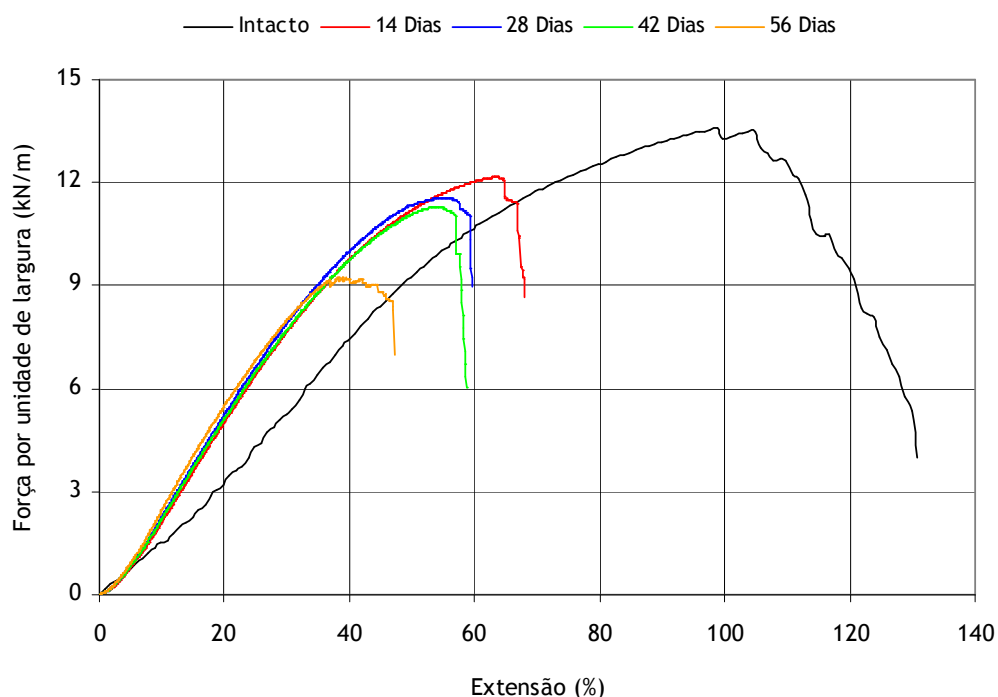


Figura 7.45 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios sucessivos de imersão em nitrato de ferro e de termo-oxidação a 110 °C.

A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B4-280 imersos em nitrato de ferro diminuiu após os ensaios de termo-oxidação (ao contrário do que aconteceu para os provetes sem imersão). Ao fim de 14 dias de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de ferro possuíam uma resistência residual de 87,1%. A resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B4-280 imersos em nitrato de ferro sofreu uma diminuição com o aumento do tempo de termo-oxidação (resistências residuais de 84,3% após 14 dias, 82,1% ao fim de 42 dias e 71,2% após 56 dias).

A extensão na força máxima dos provetes do geotêxtil B4-280 imersos em nitrato de ferro diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 56 dias de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de ferro apresentavam uma extensão na força máxima de 43,3%, enquanto que os provetes sem imersão possuíam uma extensão na força máxima de 81,7%.

A imersão em nitrato de ferro originou uma redução da robustez do geotêxtil B4-280 após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim dos 56 dias totais de exposição a 110 °C, os provetes imersos em nitrato de ferro possuíam uma robustez residual de 23,8% (após o mesmo período, os provetes sem imersão apresentavam uma robustez residual de 66,1%).

A resistência do geotêxtil B4-280 à termo-oxidação diminuiu após a imersão do material em nitrato de ferro. No entanto, a diminuição observada para o geotêxtil B4-280 (0,4% de C944) foi menor que a diminuição observada para o geotêxtil B2-280 (0,2% de C944). A Figura 7.46 compara a evolução das resistências residuais dos geotêxteis B2-280 e B4-280 (provetes previamente imersos em nitrato de ferro) durante os ensaios de termo-oxidação. A Figura 7.47 ilustra uma comparação similar para a robustez residual.

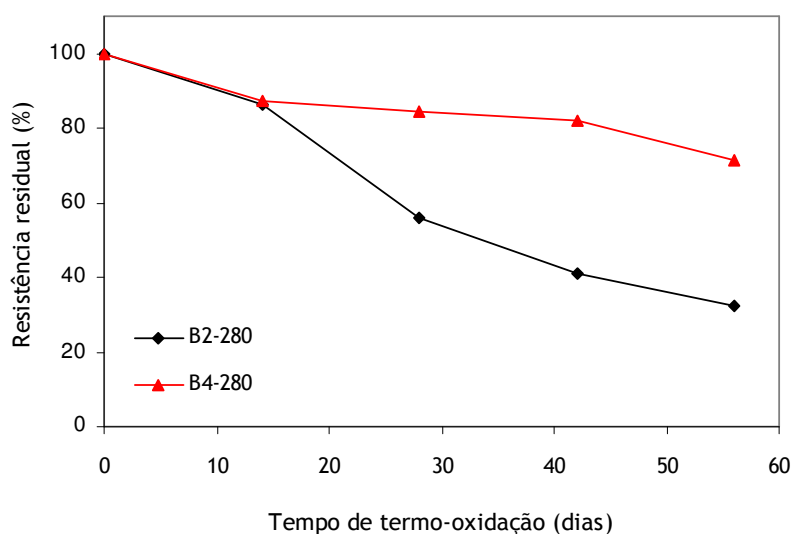


Figura 7.46 - Evolução da resistência residual dos geotêxteis B2-280 e B4-280 (provetes imersos em nitrato de ferro) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

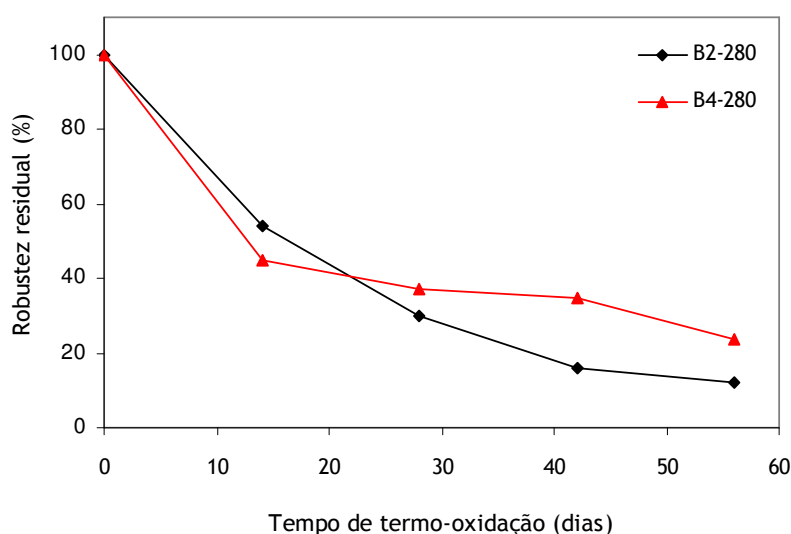


Figura 7.47 - Evolução da robustez residual dos geotêxteis B2-280 e B4-280 (provetes imersos em nitrato de ferro) ao longo dos 56 dias de termo-oxidação a 110 °C.

Ao fim de 14 dias de termo-oxidação, os provetes dos geotêxteis B2-280 e B4-280 imersos em nitrato de ferro possuíam resistências residuais semelhantes (86,3% e 87,1%, respectivamente). No entanto, à medida que o tempo de termo-oxidação aumentou, a evolução da resistência à tracção dos dois materiais foi distinta. De facto, após 56 dias de exposição a 110 °C, o geotêxtil B2-280 apresentava uma resistência residual de 32,2%, enquanto que o geotêxtil B4-280 possuía uma resistência residual de 71,2%. Ao fim de 56 dias de termo-oxidação, a robustez do geotêxtil B2-280 (robustez residual de 11,9%) também era inferior à robustez do geotêxtil B4-280 (robustez residual de 23,8%).

O geotêxtil B4-280 apresentou uma maior resistência à termo-oxidação catalisada pelo catião ferro do que o geotêxtil B2-280. Assim, o processo de termo-oxidação dos geotêxteis de PP catalisado pelo catião ferro (e eventualmente por outros catiões) poderá ser significativamente retardado pela inclusão de uma maior quantidade de C944 (ou de outros antioxidantes) nos materiais.

#### **7.3.5.10 - Considerações finais**

O processo de termo-oxidação dos geotêxteis de PP pode ser acelerado pela presença de alguns catiões metálicos. A contaminação dos geotêxteis com os catiões cobre, ferro e zinco provocou uma diminuição significativa da resistência dos materiais à termo-oxidação. A presença do catião cádmio não provocou um aumento significativo da velocidade de termo-oxidação do geotêxtil B2-280.

O aumento da concentração do catião ferro originou um aumento da velocidade de termo-oxidação do geotêxtil B2-280. O processo de termo-oxidação dos geotêxteis de PP catalisado pelo catião ferro foi retardado pela incorporação de uma maior quantidade de C944 nos materiais.

Nas suas mais variadas aplicações, os geotêxteis dificilmente estarão expostos a apenas um agente de degradação. Em muitas situações, o efeito conjunto de vários agentes de degradação não é igual à soma dos efeitos individuais de cada um dos agentes isolados (tal como nos ensaios sucessivos de imersão em soluções de catiões metálicos e de termo-oxidação). Assim, é muito importante estudar o efeito conjunto dos vários agentes de degradação na durabilidade dos geotêxteis. Deste modo, os sinergismos existentes entre os vários agentes de degradação podem ser tomados em consideração e a degradação global sofrida pelos materiais poderá ser estimada com maior exactidão.

### **7.4 - Considerações finais**

Neste capítulo, procedeu-se à avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação pelo método do forno. O efeito da temperatura na velocidade de degradação dos geotêxteis foi avaliado através da exposição dos materiais a diferentes temperaturas; os resultados experimentais obtidos a altas temperaturas foram utilizados para estimar (através da aplicação do modelo de Arrhenius) o tempo de vida dos materiais a temperaturas consideravelmente mais baixas. A resistência dos geotêxteis à termo-oxidação foi também avaliada após a imersão prévia dos materiais em soluções químicas.

No Capítulo 8, descreve-se um novo equipamento e método para avaliar a resistência dos geotêxteis à termo-oxidação. Os resultados experimentais obtidos pelo novo método serão comparados com os resultados experimentais obtidos pelo método do forno (comparação no ponto 8.6).

## **CAPÍTULO 8**

### **Desenvolvimento de um novo equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação**

#### **8.1 - Introdução**

A resistência dos geossintéticos à termo-oxidação é normalmente determinada através da exposição dos materiais a temperaturas elevadas e a atmosferas que podem, ou não, ser enriquecidas com oxigénio. No capítulo anterior, a resistência dos geotêxteis à termo-oxidação foi avaliada através do método do forno (exposição a temperaturas elevadas numa atmosfera normal de oxigénio). Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação através de um novo método de ensaio.

Neste trabalho, foram desenvolvidos um novo equipamento (um protótipo) e um novo método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. O novo método e equipamento pretendem ser um complemento e/ou uma alternativa aos métodos anteriormente existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.

Assim, neste capítulo, procede-se à descrição detalhada do equipamento protótipo construído e do método desenvolvido para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. A resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação foi avaliada através do novo método e os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos através do método do forno (Capítulo 7).

Dada a qualidade dos resultados obtidos através do novo equipamento e/ou método de avaliação da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação, em Julho de 2008, foi submetido um pedido de patente nacional ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) com o nome “Equipamento e método para testar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação”.

#### **8.2 - Equipamento desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação**

##### **8.2.1 - Descrição geral do equipamento**

O equipamento protótipo desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação é constituído por duas partes: por um autoclave (no interior do qual os geossintéticos são expostos às condições oxidantes) e por uma unidade de controlo (monitoriza e controla alguns parâmetros experimentais do ensaio, alimenta electricamente o equipamento e serve de suporte ao autoclave) (Figura 8.1).

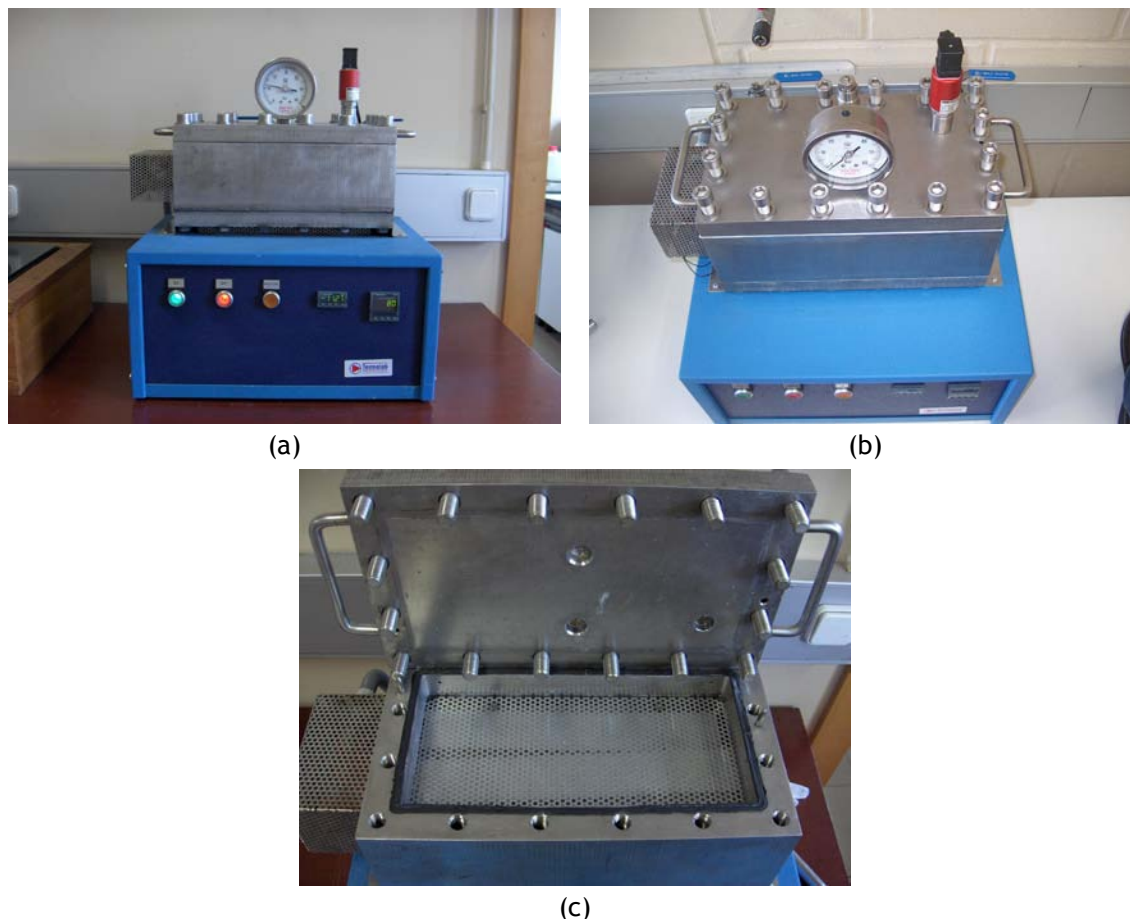


Figura 8.1 - Equipamento protótipo desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação: (a) vista de frente; (b) vista de cima (autoclave fechado); (c) vista de cima (autoclave aberto).

O equipamento desenvolvido permite realizar ensaios de termo-oxidação em meio líquido, com os geossintéticos expostos a temperaturas e a pressões de oxigénio elevadas. A temperatura máxima de trabalho é de 120 °C, enquanto que a pressão máxima de trabalho é de 50 bar. O volume máximo do líquido de imersão é cerca de 4 litros.

A elevada pressão de oxigénio no interior do autoclave pode ser obtida através de dois modos: (1) através da utilização de peróxido de hidrogénio como solução de imersão (que por decomposição origina oxigénio) ou (2) através da pressurização do autoclave com oxigénio a alta pressão oriundo de uma fonte externa (vindo de uma garrafa de oxigénio). No entanto, a segunda hipótese não foi experimentada devido aos custos associados à utilização de oxigénio a alta pressão e às questões de segurança que isso exige.

O corpo central do autoclave (paredes laterais) é um bloco maquinado em aço inoxidável (tipo AISI 304) que não apresenta quaisquer soldaduras. A parede superior (tampa) e a parede inferior do autoclave são também dois blocos em aço inoxidável (tipo AISI 304). A parede inferior foi soldada e aparafusada ao corpo principal do autoclave através de 16 parafusos de segurança do tipo M16. O acesso ao interior do autoclave é efectuado pela parede superior (tampa amovível) que é fechada através de 16 parafusos de segurança (tipo M16). Um vedante (um fio de viton com 5,33 mm de diâmetro) encontra-se instalado numa ranhura maquinada no corpo central do autoclave e, quando

a parede superior é fechada, permite o isolamento e a estanquicidade do equipamento (evitando a ocorrência de fugas líquidas ou gasosas). Todas as paredes do autoclave possuem cerca de 30 mm de espessura. As dimensões (comprimento, largura e altura) do autoclave e da unidade de controlo encontram-se resumidas no Quadro 8.1.

Quadro 8.1 - Dimensões do equipamento protótipo desenvolvido.

| Dimensões              | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Altura (mm) |
|------------------------|------------------|--------------|-------------|
| Unidade de controlo    | 507              | 372          | 252         |
| Autoclave (exterior)   | 390              | 220          | 180         |
| Autoclave (interior) * | 320              | 150          | 120         |

\*Dimensões úteis de trabalho

Os geossintéticos são colocados no interior do autoclave num suporte que consiste numa grelha com três níveis de chapa perfurada em aço inoxidável (Figura 8.2). Este suporte permite a colocação de quatro provetes com 300 mm de comprimento e 5 mm de largura (dimensões compatíveis com os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3).

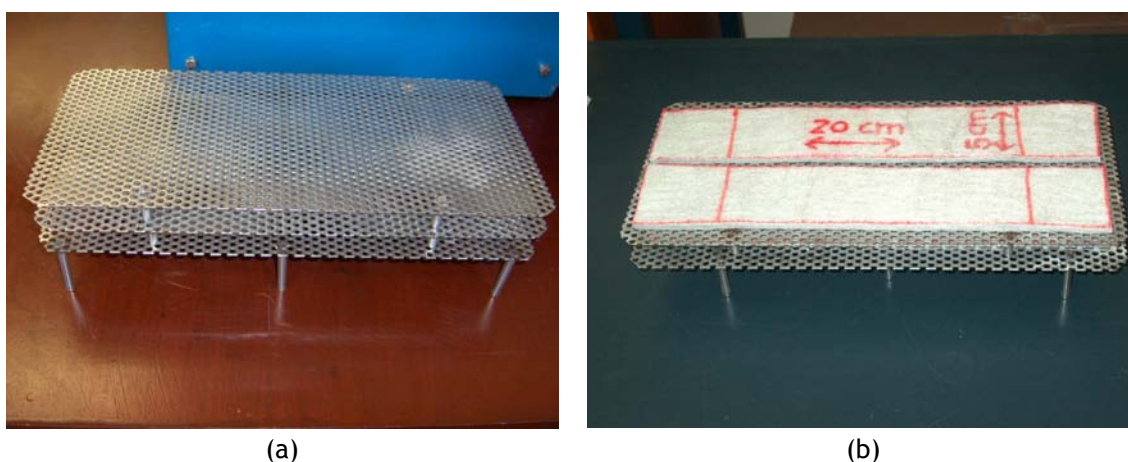


Figura 8.2 - Suportes usados para a colocação dos geossintéticos no interior do autoclave: (a) vista geral dos suportes; (b) suportes com provetes de um geotêxtil.

O equipamento possui vários componentes instalados para o controlo e/ou monitorização de alguns parâmetros do ensaio. A descrição detalhada de cada um desses componentes encontra-se no ponto 8.2.3. O equipamento desenvolvido é robusto, estável e pode funcionar durante um longo período de tempo sem grandes necessidades de manutenção.

### 8.2.2 - Esquemas do equipamento desenvolvido

Os esquemas do equipamento desenvolvido encontram-se ilustrados na Figura 8.3 (vista de frente), na Figura 8.4 (vista de trás), na Figura 8.5 (vista de cima, autoclave fechado) e na Figura 8.6 (vista de cima, autoclave aberto).

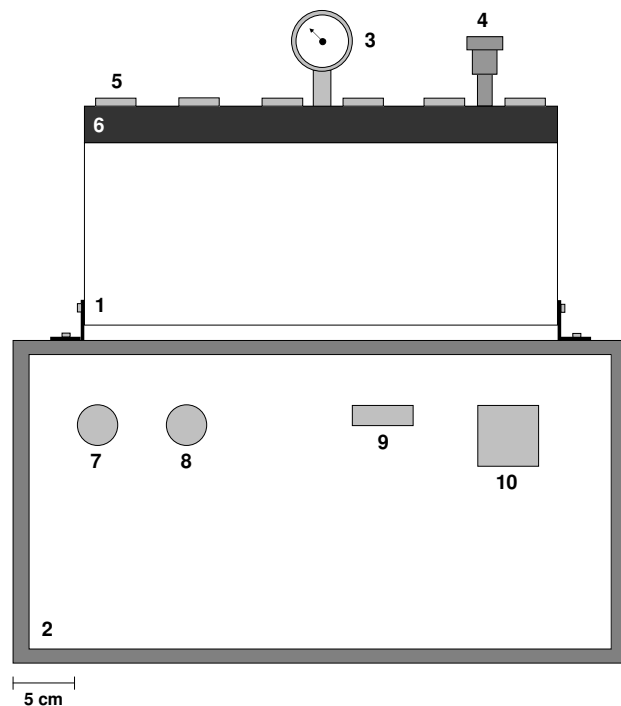


Figura 8.3 - Esquema do equipamento desenvolvido (vista de frente).

Legenda: (1) corpo principal do autoclave; (2) unidade de controlo; (3) manómetro; (4) transdutor de pressão; (5) parafuso de segurança; (6) parede superior do autoclave; (7) botão de alimentação geral; (8) botão de alimentação da resistência eléctrica; (9) indicador de pressão; (10) controlador da temperatura.

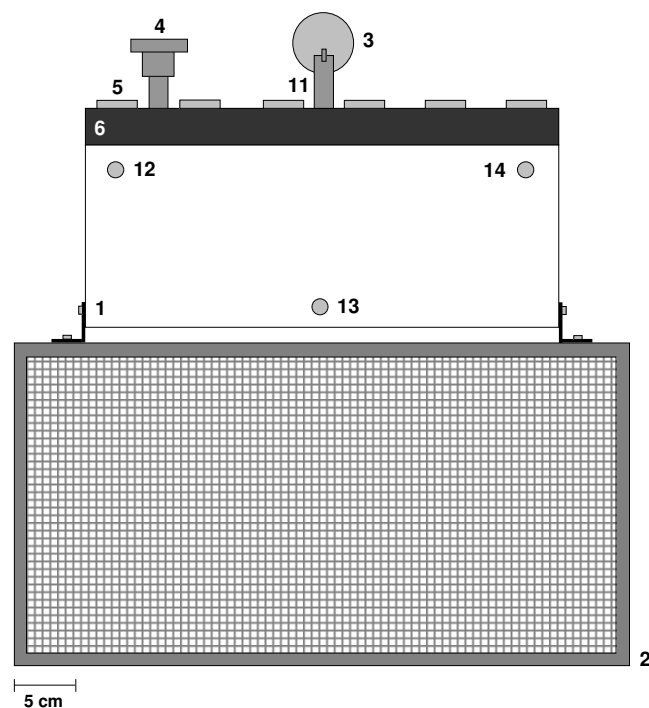


Figura 8.4 - Esquema do equipamento desenvolvido (vista de trás).

Legenda: (1) corpo principal do autoclave; (2) unidade de controlo; (3) manómetro; (4) transdutor de pressão; (5) parafuso de segurança; (6) parede superior do autoclave; (11) válvula de segurança; (12) válvula de despressurização; (13) válvula de drenagem do líquido (14) válvula de pressurização.



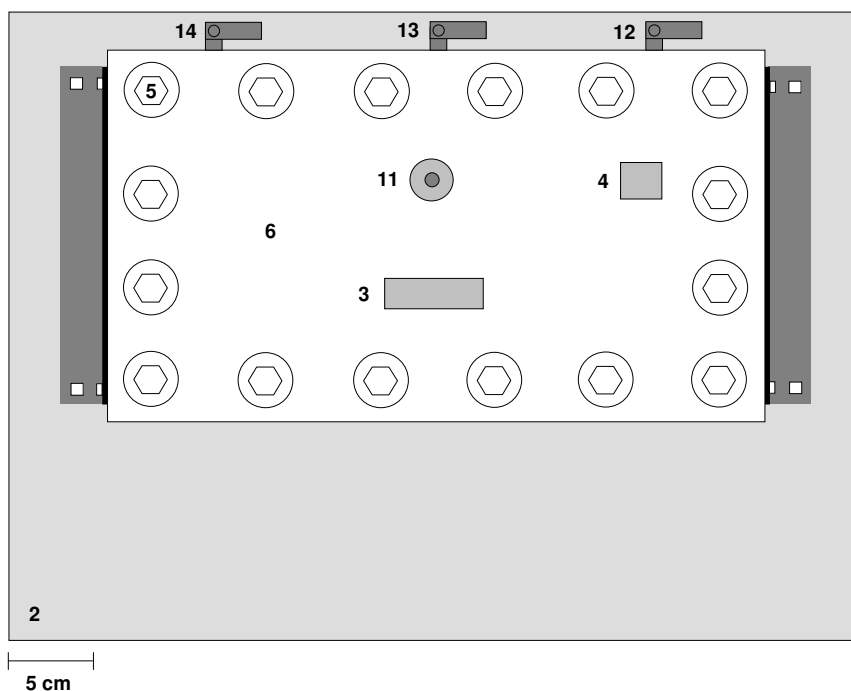


Figura 8.5 - Esquema do equipamento desenvolvido (vista de cima, autoclave fechado).

Legenda: (2) unidade de controlo; (3) manómetro; (4) transdutor de pressão; (5) parafuso de segurança; (6) parede superior do autoclave; (11) válvula de segurança; (12) válvula de despressurização; (13) válvula de drenagem do líquido; (14) válvula de pressurização.

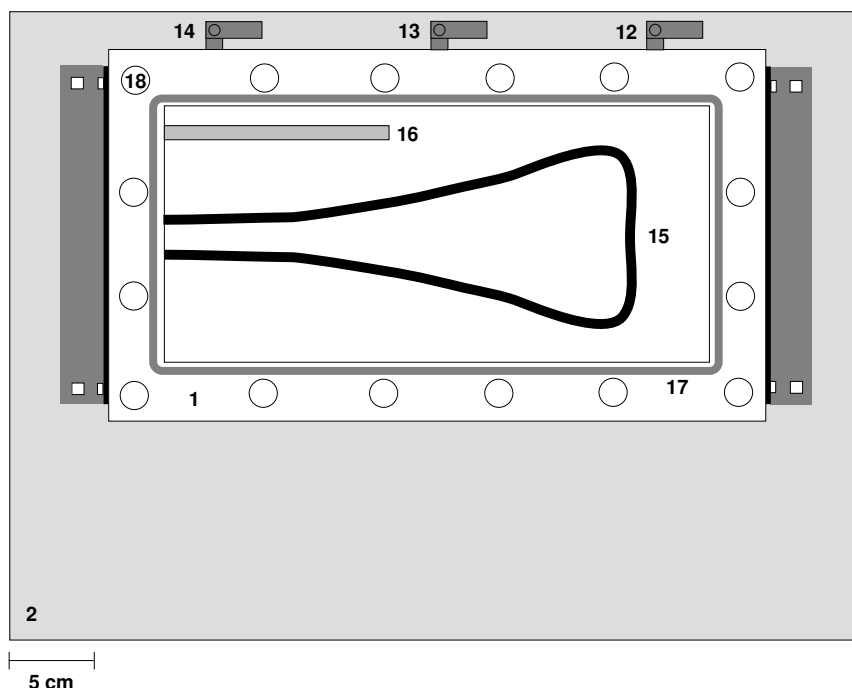


Figura 8.6 - Esquema do equipamento desenvolvido (vista de cima, autoclave aberto).

Legenda: (1) corpo principal do autoclave; (2) unidade de controlo; (12) válvula de despressurização; (13) válvula de drenagem do líquido; (14) válvula de pressurização; (15) resistência eléctrica de aquecimento; (16) sonda de temperatura; (17) vedante; (18) local de aperto dos parafusos.

### 8.2.3 - Componentes instalados no equipamento

#### 8.2.3.1 - Componentes instalados na parede superior do autoclave

Na parede superior do autoclave encontram-se instalados os seguintes componentes (Figura 8.7):

- Manómetro indicador de pressão *NUOVA FIMA* (escala de leitura até 60 bar);
- Transdutor de pressão *HUBA CONTROL*;
- Válvula de segurança em aço inoxidável (regulada para 50 bar).



(a)



(b)



(c)

Figura 8.7 - Componentes instalados na parede superior do autoclave:  
(a) manómetro; (b) transdutor de pressão; (c) válvula de segurança.

#### 8.2.3.2 - Componentes instalados na parede traseira do autoclave

Na parede traseira do autoclave encontram-se instalados os seguintes componentes (Figura 8.8):

- Válvula de despressurização (aço inoxidável, válvula de ¼ polegadas);
- Válvula de drenagem de líquido (aço inoxidável, válvula de ¼ polegadas);
- Válvula de pressurização (aço inoxidável, válvula de ¼ polegadas).

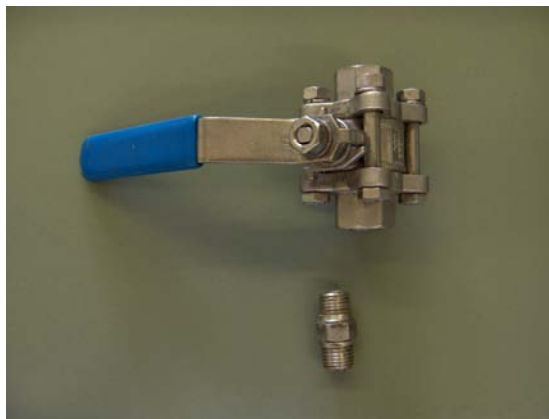


Figura 8.8 - Componentes instalados na parede traseira do autoclave: válvula de ¼ polegadas.

#### 8.2.3.3 - Componentes instalados no interior do autoclave

No interior do autoclave encontram-se instalados os seguintes componentes (Figura 8.9):

- Sonda de temperatura do tipo PT100;
- Resistência eléctrica de aquecimento.



(a)



(b)

Figura 8.9 - Componentes instalados no interior do autoclave: (a) resistência eléctrica de aquecimento e sonda de temperatura PT100; (b) pormenor da sonda de temperatura PT100.

#### 8.2.3.4 - Componentes instalados na unidade de controlo

Na unidade de controlo encontram-se instalados os seguintes componentes (Figura 8.10):

- Controlador de temperatura *Eurotherm 2116*;
- Indicador de pressão *Eurotherm 2132*;
- Botão de alimentação geral;
- Botão de alimentação da resistência eléctrica.



Figura 8.10 - Componentes instalados na unidade de controlo:

(a) indicador de pressão (à esquerda) e controlador de temperatura (à direita); (b) botão de alimentação geral (botão verde) e botão de alimentação da resistência eléctrica (botão vermelho).

#### 8.2.3.5 - Funções dos componentes instalados no equipamento

Em seguida, descrevem-se as funções dos componentes instalados no equipamento desenvolvido (os números associados aos componentes são os mesmos números pelos quais estes foram identificados nos diversos esquemas do equipamento - Figuras 8.3, 8.4, 8.5 e 8.6).

Manómetro (3) - Permite monitorizar a pressão desenvolvida no interior do autoclave.

Transdutor de pressão (4) - Este acessório encontra-se ligado ao indicador de pressão (9) localizado no painel frontal da unidade de controlo; possui a função de ler a pressão no interior do autoclave.

Botão de alimentação geral (7) - Permite ligar e desligar o equipamento da alimentação eléctrica; na posição de ligado, alimenta o controlador de temperatura (10) e a sonda de temperatura (16), bem como o indicador de pressão (9) e o transdutor de pressão (4).

Botão de alimentação da resistência eléctrica (8) - Permite ligar e desligar a resistência eléctrica de aquecimento (15).

Indicador de pressão (9) - Este componente encontra-se ligado ao transdutor de pressão (4) e indica o valor da pressão no interior do autoclave.

Controlador de temperatura (10) - Este componente é responsável pela regulação da temperatura no interior do autoclave. Permite seleccionar a temperatura do ensaio e faz a sua monitorização ao longo do tempo. O controlador de temperatura encontra-se ligado à sonda de temperatura (16) e à resistência eléctrica de aquecimento (15), de modo a atingir e manter a temperatura especificada pelo operador.

Válvula de segurança (11) - Este componente assegura que a pressão no interior do autoclave não irá ultrapassar os 50 bar (pressão máxima de trabalho). Esta válvula encontra-se devidamente regulada para permitir a libertação de gás sempre que a pressão no interior do autoclave atinja os 50 bar.

Válvula de despressurização (12) - esta válvula permite despressurizar o autoclave antes da abertura para recolha das amostras expostas ao ensaio de termo-oxidação.

Válvula de drenagem de líquido (13) - Esta válvula permite a drenagem da solução de imersão após o ensaio de termo-oxidação.

Válvula de pressurização (14) - Esta válvula permite a entrada de oxigénio (a partir de uma garrafa) para a pressurização do autoclave (não foram efectuados ensaios com este tipo de pressurização).

Resistência eléctrica de aquecimento (15) - Este componente encontra-se ligado ao controlador de temperatura (10). A função deste componente é aquecer a solução de imersão durante o ensaio de termo-oxidação.

Sonda de temperatura (16) - Este componente encontra-se ligado ao controlador de temperatura (10) e tem como função a leitura da temperatura no interior do autoclave.

#### **8.2.4 - Sistema de fecho e de estanquicidade do autoclave**

O equipamento protótipo desenvolvido tem como função expor os geossintéticos, em meio líquido, a temperaturas e pressões elevadas. Assim, é indispensável que o equipamento possua um sistema de controlo e manutenção de temperatura e não permita quaisquer fugas gasosas e/ou líquidas para o exterior. O principal problema a ultrapassar no desenvolvimento do equipamento foi a remoção de todas as fugas gasosas e/ou líquidas, de modo a assegurar a estanquicidade do autoclave.

O acesso ao interior do autoclave é realizado pela sua parede superior, pelo que esta deverá possuir uma sistema de fecho que não permita a libertação de gases e/ou líquidos para o exterior durante o ensaio de termo-oxidação. A parede superior do autoclave é fechada pelo aperto de 16 parafusos de segurança e a sua estanquicidade é assegurada por um vedante (colocado numa ranhura esculpida no corpo central do autoclave) (Figura 8.11). O aperto da parede superior do autoclave comprime o vedante, garantindo deste modo a inexistência de fugas pela tampa do equipamento.

O vedante deve ser construído a partir de um material relativamente inerte e muito resistente, pois não se pode degradar nem deformar sob a acção de temperaturas e pressões de oxigénio elevadas. Os vedantes utilizados foram fabricados a partir de cordão de viton (com um diâmetro de 5,33 mm).

O vedante de viton utilizado sofre degradação ao longo do tempo (começam a aparecer rasgos que provocam uma diminuição da sua eficiência), pelo que é necessário proceder regularmente à sua substituição (Figura 8.12). A experiência mostrou que o vedante de viton usado pode desempenhar eficazmente a sua função em mais do que um ensaio de termo-oxidação. No entanto, e sempre que possível, é aconselhável a utilização de um vedante novo em cada ensaio, de modo a assegurar a inexistência de fugas no autoclave (a existência de fugas gasosas pode ser facilmente identificada pela monitorização da pressão no interior do autoclave).

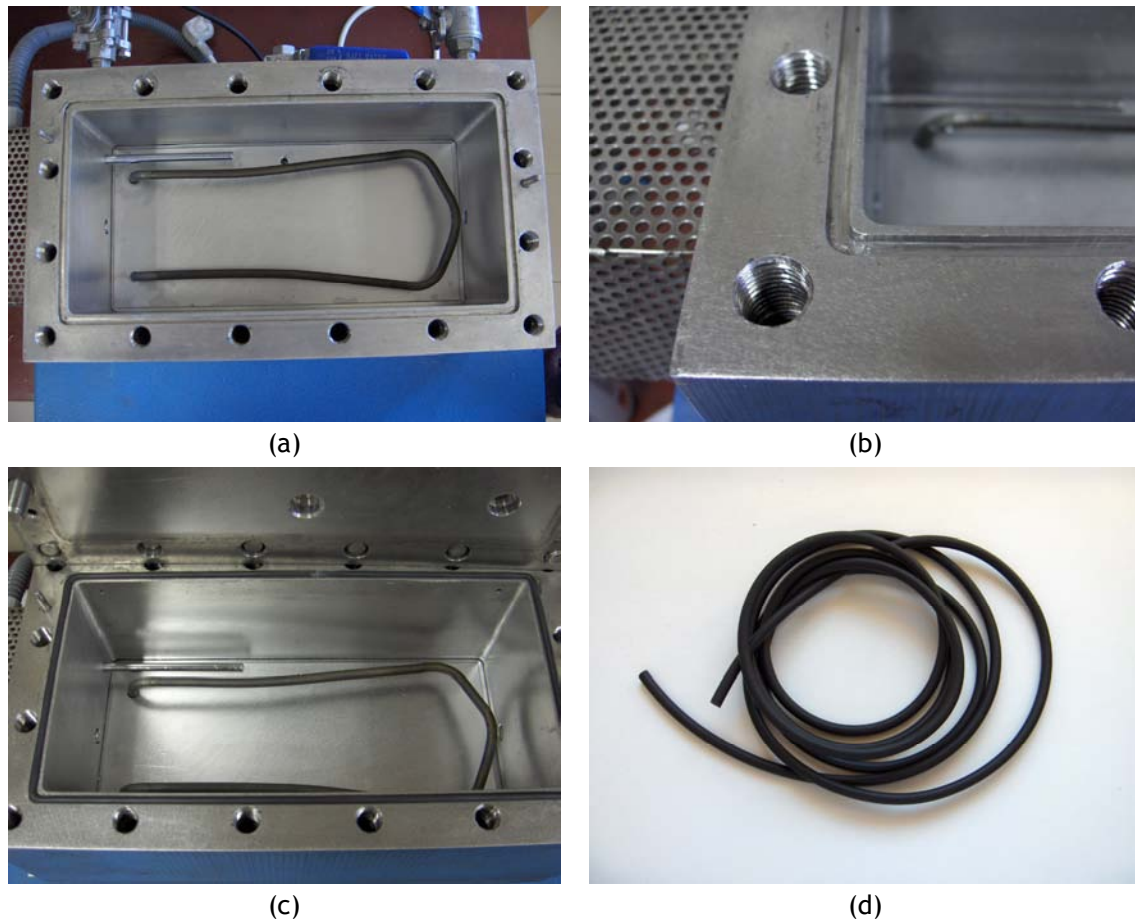


Figura 8.11 - Sistema de fecho e estanquicidade da parede superior do autoclave: (a) autoclave sem o vedante; (b) pormenor da ranhura onde o vedante é colocado; (c) autoclave com o vedante; (d) cordão de viton usado como vedante.

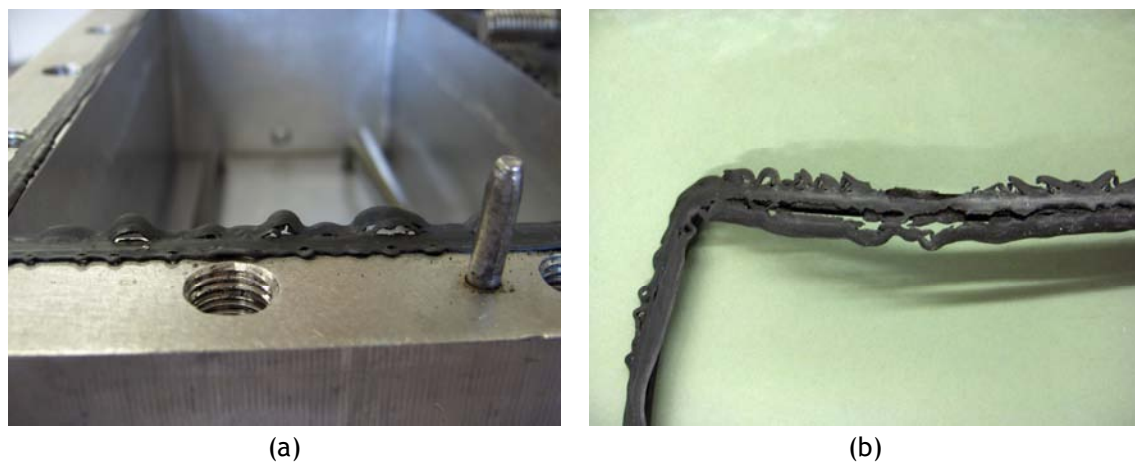


Figura 8.12 - Danos sofridos pelo vedante ao longo do tempo: (a) vedante instalado no autoclave; (b) pormenor de um vedante danificado.

As zonas de ligação entre os diversos componentes e as paredes do autoclave são outros locais por onde podem ocorrer fugas gasosas e/ou líquidas. Assim, todos os componentes directamente ligados às paredes do autoclave foram enroscados com uma pasta à base de teflon (marca *Domax*® *Lock*, DL 5.72), de modo a evitar a existência de fugas nas zonas de ligação dos componentes. No entanto, verificou-se que a pasta de teflon também sofre alguma degradação ao longo do tempo, deixando

de garantir a estanquicidade dessas ligações. Assim, todas as ligações entre os vários componentes e o autoclave devem ser rectificadas periodicamente (uma operação de manutenção anual deverá ser suficiente).

O problema da existência de fugas pelas zonas de enroscamento poderia ser resolvido em definitivo se os componentes fossem soldados às paredes do autoclave. No entanto, esta solução tornaria mais complicada a substituição futura de um componente que eventualmente se pudesse vir a danificar.

#### 8.2.5 - Aperfeiçoamentos futuros do equipamento

Na fase actual de desenvolvimento, o equipamento construído encontra-se a operar sem nenhuma limitação. No entanto, e como em qualquer outro protótipo, algumas modificações poderão vir a ser introduzidas em futuras versões do equipamento, de modo a melhorar o seu desempenho.

A pressão do autoclave é um bom indicador da maior ou menor agressividade do ensaio. Além disso, é também um indicador da eficiência do vedante e da existência ou não de fugas nas ligações entre os diversos componentes e o autoclave. Assim, seria importante acoplar um computador ao sistema que (através de uma aplicação simples) possa adquirir e registar os valores da pressão (e também da temperatura) ao longo do ensaio (no estado actual, o equipamento indica os valores instantâneos da pressão e da temperatura, mas não efectua qualquer registo dos mesmos). O registo dos valores de pressão e de temperatura irá permitir uma comparação mais rigorosa das condições oxidantes entre diferentes ensaios de termo-oxidação.

Um outro exemplo de uma possível alteração futura no equipamento poderia passar pelo aumento do volume interno do autoclave (o que iria permitir a exposição simultânea de um maior número de provetes dos geossintéticos ou então a exposição de provetes com maiores dimensões).

### 8.3 - Método desenvolvido para a realização de ensaios de termo-oxidação

No novo método, os geossintéticos são imersos, a temperaturas elevadas, numa solução de peróxido de hidrogénio. Por acção da temperatura, o peróxido de hidrogénio é decomposto exotermicamente em água e em oxigénio gasoso (Reacção 8.1), o que provoca o aumento da pressão no interior do autoclave (o autoclave não permite a libertação do gás formado para o exterior).



A temperatura do ensaio e a concentração do peróxido de hidrogénio podem ser seleccionadas pelo operador (tornando as condições de oxidação mais ou menos agressivas). O aumento da temperatura do ensaio provoca uma aceleração do processo de oxidação, enquanto que a sua diminuição torna o processo de degradação mais lento. O aumento da concentração de peróxido de hidrogénio origina a libertação de uma maior quantidade de oxigénio, o que resulta numa maior pressão no interior do autoclave.



Os provetes dos geossintéticos podem ser expostos até uma temperatura máxima de 120 °C e até uma pressão máxima de 50 bar. O volume máximo da solução de peróxido de hidrogénio é de 4 L. A duração do ensaio é definida pelo operador.

Em seguida, descreve-se a forma seleccionada para expor os geotêxteis à termo-oxidação pelo novo método. Os geotêxteis (4 provetes com 300 mm de comprimento e 50 mm de largura) são imersos em 4 L de uma solução de peróxido de hidrogénio (a 15 volumes) e a parede superior do autoclave é fechada. A temperatura é regulada para 80 °C e, ao fim de algumas horas, a pressão no interior do autoclave estabiliza em 35-40 bar. Após alguns dias (normalmente 14 dias ou 28 dias), o autoclave é despressurizado, o líquido de imersão é removido e os provetes dos geotêxteis são recolhidos (para secagem e posterior avaliação dos danos causados pela termo-oxidação).

## **8.4 - Comparação do novo método/equipamento com os outros métodos existentes**

### **8.4.1 - Distinção entre o presente método e os outros métodos existentes**

Actualmente, existem dois outros métodos para a determinação da resistência dos geossintéticos à oxidação (métodos descritos na norma NP EN ISO 13438): um método que utiliza altas temperaturas como factor de aceleração e outro método que usa temperaturas moderadamente elevadas (80 °C) e alta pressão de oxigénio (50 bar). Neste último método, os materiais são imersos numa solução aquosa de  $\text{NaHCO}_3$  e a pressurização do equipamento é feita através da introdução de oxigénio puro gasoso a alta pressão.

O equipamento e método desenvolvidos neste trabalho são uma nova alternativa para determinar a resistência dos geossintéticos à oxidação, apresentando várias diferenças em relação aos métodos existentes.

Relativamente ao método do forno, o novo método de ensaio é totalmente distinto, não havendo qualquer comparação possível em termos de equipamento e/ou metodologia de ensaio. O método do forno (Capítulo 7) utiliza apenas o aumento da temperatura para acelerar a degradação oxidativa dos materiais e os ensaios podem ser realizados em fornos convencionais com circulação de ar.

Relativamente ao método de ensaio com elevada pressão de oxigénio descrito na norma NP EN ISO 13438, existem várias diferenças no equipamento necessário para a realização do ensaio, bem como na adaptação do laboratório à execução do ensaio. A fonte de oxigénio é distinta nos dois métodos de ensaio, assim como o meio em que os geossintéticos são imersos.

### **8.4.2 - Vantagens e desvantagens do novo método em relação aos outros métodos existentes**

O novo método e equipamento de ensaio possuem algumas vantagens relativamente aos outros dois métodos existentes para determinar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. Assim, em seguida, procede-se à discussão das vantagens (e das desvantagens) do novo método relativamente aos métodos anteriormente existentes.



As condições oxidantes utilizadas no método do forno não são muito drásticas, funcionando apenas relativamente bem para distinguir (em termos de resistência à oxidação) materiais estabilizados de materiais não estabilizados (tal como foi mostrado no ponto 7.3.1). O novo método de ensaio utiliza condições de exposição mais drásticas que o método do forno e, deste modo, permite a distinção de materiais com diferentes graus de estabilização (tal como se verá mais adiante neste capítulo). Os ensaios realizados mostraram que materiais que não foram distinguidos pelo método do forno (em termos de resistência à oxidação) foram facilmente distinguidos pelo novo método.

O novo método também possui algumas desvantagens relativamente ao método do forno: (1) o novo método requer um equipamento específico apto para trabalhar sob pressões elevadas de oxigénio que não existe comercialmente no mercado (o método do forno utiliza de um forno convencional, disponível na maioria dos laboratórios); (2) consumo de reagentes (o método do forno não consome reagentes; no entanto, o custo do peróxido de hidrogénio é relativamente baixo).

O método de ensaio com elevada pressão de oxigénio descrito na norma NP EN ISO 13438 obriga à implementação de algumas medidas de segurança no laboratório para a utilização de oxigénio puro a alta pressão no equipamento. Assim, o uso de oxigénio (um comburente) implica a adaptação do laboratório (instalação de detectores de oxigénio, instalação de uma rede de gás preparada para altas pressões), o que torna o método de ensaio bastante dispendioso.

O novo método é mais simples, mais barato e apresenta uma maior segurança que o método de alta pressão de oxigénio descrito na norma NP EN ISO 13438. O uso de peróxido de hidrogénio em vez do oxigénio origina uma redução do custo do ensaio (quer pelo facto do peróxido de hidrogénio ser bastante mais barato que o oxigénio, quer pelo facto de não ser necessário nenhuma adaptação no laboratório para a utilização do peróxido de hidrogénio). O novo método é também mais seguro, pois não necessita de nenhuma fonte de oxigénio a alta pressão (eliminando assim os problemas de segurança que daí podem resultar). Além disso, o armazenamento do peróxido de hidrogénio implica menores questões de segurança que o armazenamento de oxigénio puro a alta pressão.

O novo método de ensaio não possui nenhuma desvantagem conhecida relativamente ao método de ensaio com elevada pressão de oxigénio descrito na norma NP EN ISO 13438. No entanto, e apesar do equipamento desenvolvido permitir a realização desse tipo de ensaios, também não foram realizados nenhuns ensaios utilizando o método de alta pressão descrito na norma NP EN ISO 13438 (devido a questões de segurança e aos custos associados à realização desse tipo de ensaios).

## **8.5 - Determinação da resistência dos geotêxteis à oxidação através do novo método**

### **8.5.1 - Descrição do ensaio**

Os geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 foram imersos em 4 L de peróxido de hidrogénio (15 volumes) à temperatura de 80 °C. Nestas condições, a pressão no interior do autoclave atingiu cerca de 35-40 bar. O geotêxtil B0-500 foi exposto aos ensaios de termo-oxidação durante 7, 14 e 28 dias, enquanto que os geotêxteis B2-500 e B4-500 foram expostos durante 14 e 28 dias.

Os provetes expostos (4 provetes) possuíam 50 mm de largura e 300 mm de comprimento. Após os ensaios de termo-oxidação, os provetes foram lavados (com água desionizada) e foram secos, pelo menos durante 7 dias, em local escuro e seco. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3 (a descrição do ensaio de tracção-extensão encontra-se no ponto 4.6). A ocorrência de alterações microscópicas nos materiais foi avaliada por MEV.

Antes da realização dos ensaios de termo-oxidação através do novo método, foi realizado um ensaio de teste em que o geotêxtil B0-500 foi imerso, a 80 °C, em 4 L de água (em substituição do peróxido de hidrogénio) durante 28 dias. A temperatura manteve-se constante durante o ensaio e a pressão no interior do autoclave atingiu cerca de 0,5 bar. A cor dos provetes e a cor da solução de imersão mantiveram-se inalteradas ao longo do ensaio. As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500 não sofreram alterações significativas após o ensaio de teste.

O ensaio de teste (nas mesmas condições dos ensaios de termo-oxidação, mas usando água em vez do peróxido de hidrogénio) permitiu concluir que a imersão em água não origina o desenvolvimento de pressão no interior do autoclave e não provoca danos significativos ao geotêxtil B0-500. Assim, os danos que os geotêxteis possam sofrer durante os ensaios de termo-oxidação serão apenas devidos à acção oxidante do peróxido de hidrogénio.

#### 8.5.2 - Evolução da temperatura e da pressão ao longo dos ensaios de termo-oxidação

A temperatura e a pressão são dois parâmetros que podem influenciar a velocidade de oxidação dos geotêxteis. Assim, os valores da temperatura e da pressão foram registados (manualmente) ao longo dos ensaios de termo-oxidação. A Figura 8.13 ilustra a variação da temperatura ao longo dos ensaios de termo-oxidação (são apresentados os valores de dois ensaios, designados por “Ensaio A” e por “Ensaio B”).

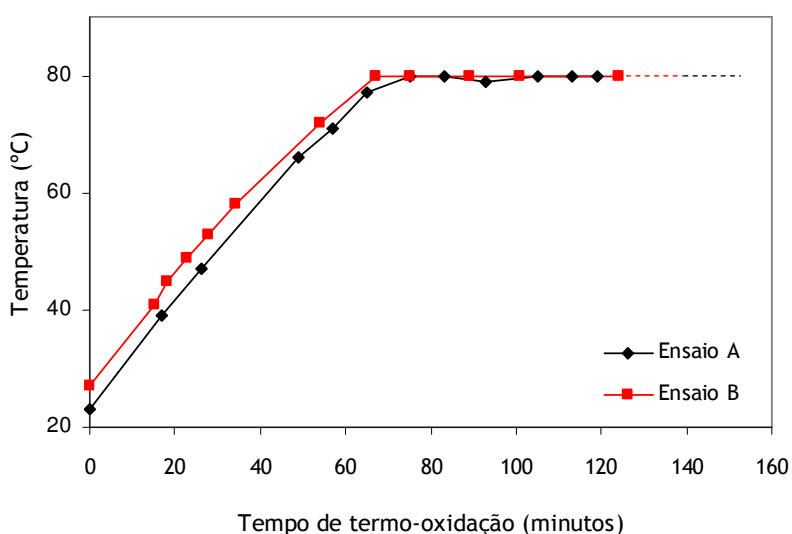


Figura 8.13 - Evolução da temperatura no autoclave durante os ensaios de termo-oxidação.

O autoclave demora cerca de 70 minutos a atingir a temperatura especificada de 80 °C. Após atingir os 80 °C, a temperatura mantém-se relativamente constante durante os ensaios de termo-oxidação (variações máximas de  $\pm 1$  °C).

A pressão é um indicador da maior ou menor agressividade do ensaio de termo-oxidação e permite avaliar a existência de fugas gasosas no autoclave. A Figura 8.14 ilustra a variação da pressão em vários ensaios de termo-oxidação (em ensaios válidos e em ensaios rejeitados devido à ocorrência de fugas gasosas).

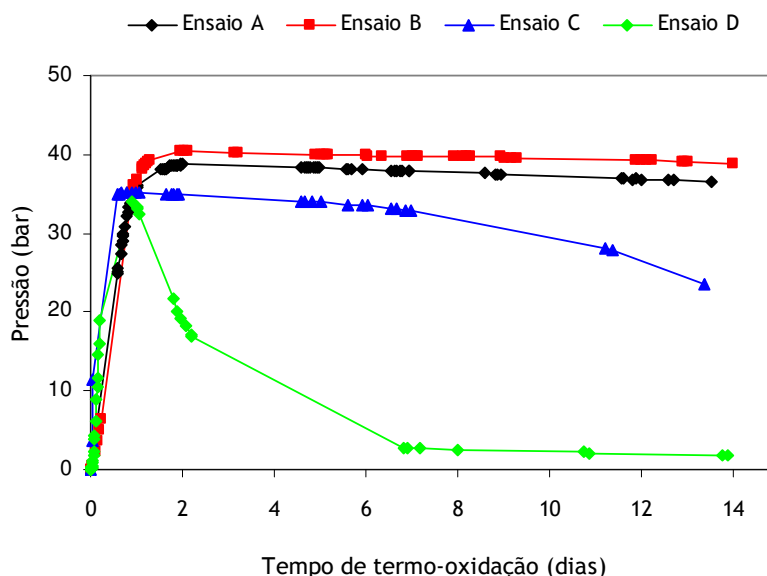


Figura 8.14 - Evolução da pressão no autoclave durante os ensaios de termo-oxidação.

Os ensaios A e B correspondem a ensaios em que não ocorreram fugas no equipamento, pelo que foram considerados válidos. Nesses ensaios, a pressão atingiu o valor máximo após cerca de 2 dias de termo-oxidação (39 bar no ensaio A e 40 bar no ensaio B). Depois de atingir o valor máximo, a pressão não sofreu grandes alterações ao longo do tempo (apenas uma diminuição pequena e muito lenta, que poderá ser devida ao consumo de oxigénio durante o processo de oxidação).

A evolução da pressão no ensaio C indica a existência de ligeiras fugas gasosas no equipamento. De facto, após ter atingido o valor máximo (35 bar) a pressão sofreu uma diminuição ao longo do tempo (após 13 dias de ensaio, a pressão apresentava um valor de 23 bar). A existência de fugas deste tipo não é facilmente perceptível sem a monitorização dos valores da pressão do equipamento. Assim, e de modo a tornar o equipamento mais autónomo, seria importante desenvolver um sistema que possibilitasse o registo automático dos valores da pressão.

No ensaio D, a pressão atingiu o valor máximo (34 bar) após 1 dia de ensaio. No entanto, a pressão diminuiu muito rapidamente, indicando a existência de fugas gasosas no equipamento (após 7 dias de ensaio, a pressão era aproximadamente 3 bar). A existência de fugas gasosas tão elevadas pode ser identificada mesmo sem a necessidade do recurso à monitorização dos valores da pressão.

Os ensaios em que ocorreram fugas gasosas foram rejeitados. Na maioria dos casos, as fugas gasosas ocorreram devido à degradação do vedante de viton, pelo que, o problema ficou resolvido pela sua substituição. Em alguns casos, as fugas gasosas ocorreram pelas zonas de ligação dos componentes ao autoclave, pelo que, foi necessário proceder à rectificação dessas ligações.

### 8.5.3 - Resistência do geotêxtil B0-500 à termo-oxidação

A cor do geotêxtil B0-500 (originalmente branca) não sofreu qualquer alteração durante os primeiros 7 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio. A cor da solução de imersão (originalmente incolor) manteve-se igualmente inalterada. A existência de danos no geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação foi facilmente visível: os provetes possuíam algumas zonas degradadas e libertavam imensas fibras danificadas (algumas delas encontravam-se a boiar na solução de imersão ou então agarradas às paredes do autoclave). A Figura 8.15 ilustra o aspecto do geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação no autoclave.

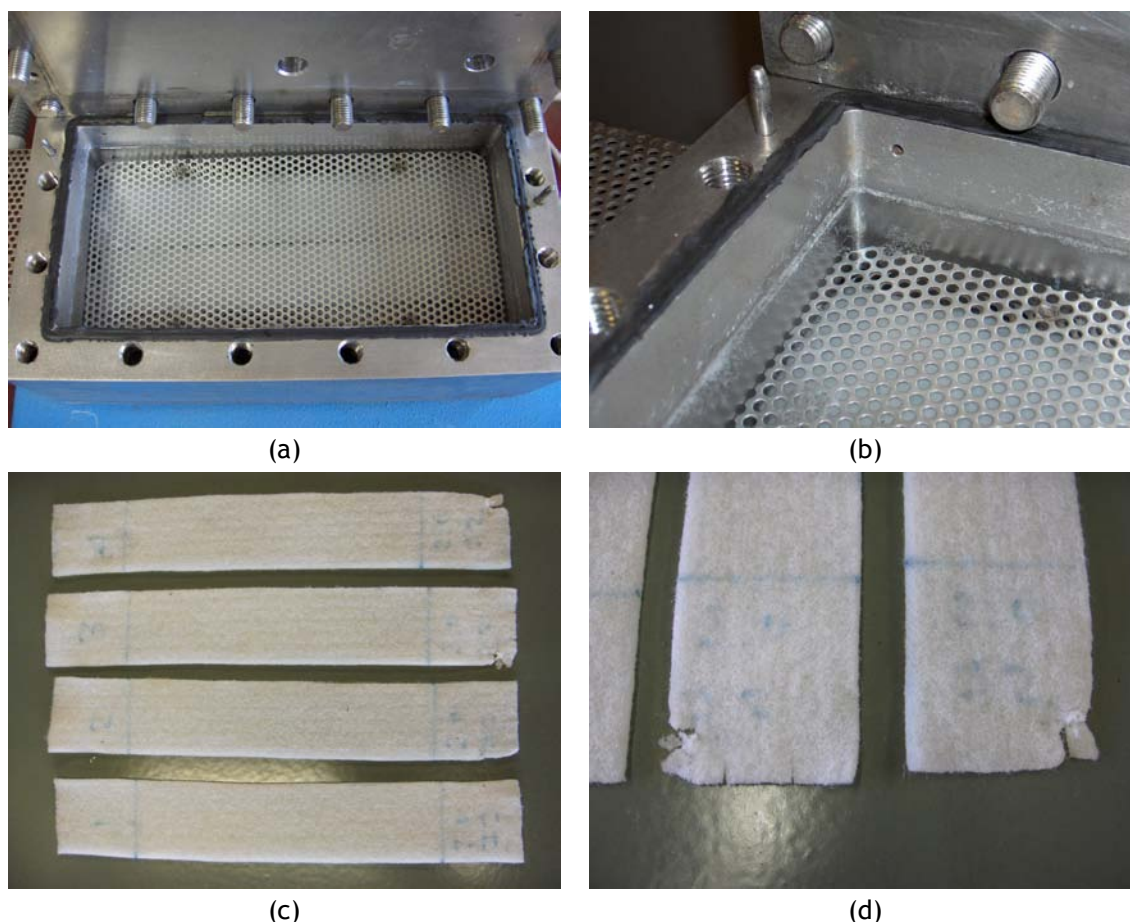


Figura 8.15 - Aspecto do geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) fibras degradadas no interior do autoclave; (c) aspecto geral dos provetes; (d) pormenor dos danos sofridos pelos provetes.

Ao fim de 14 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B0-500 possuía uma cor amarela, libertava muitas fibras danificadas e podia ser facilmente transformado em pequenos pedaços ou mesmo em pó. A solução de imersão também apresentava uma cor amarela e libertava um odor intenso a “plástico queimado”. A Figura 8.16 ilustra o aspecto do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação.

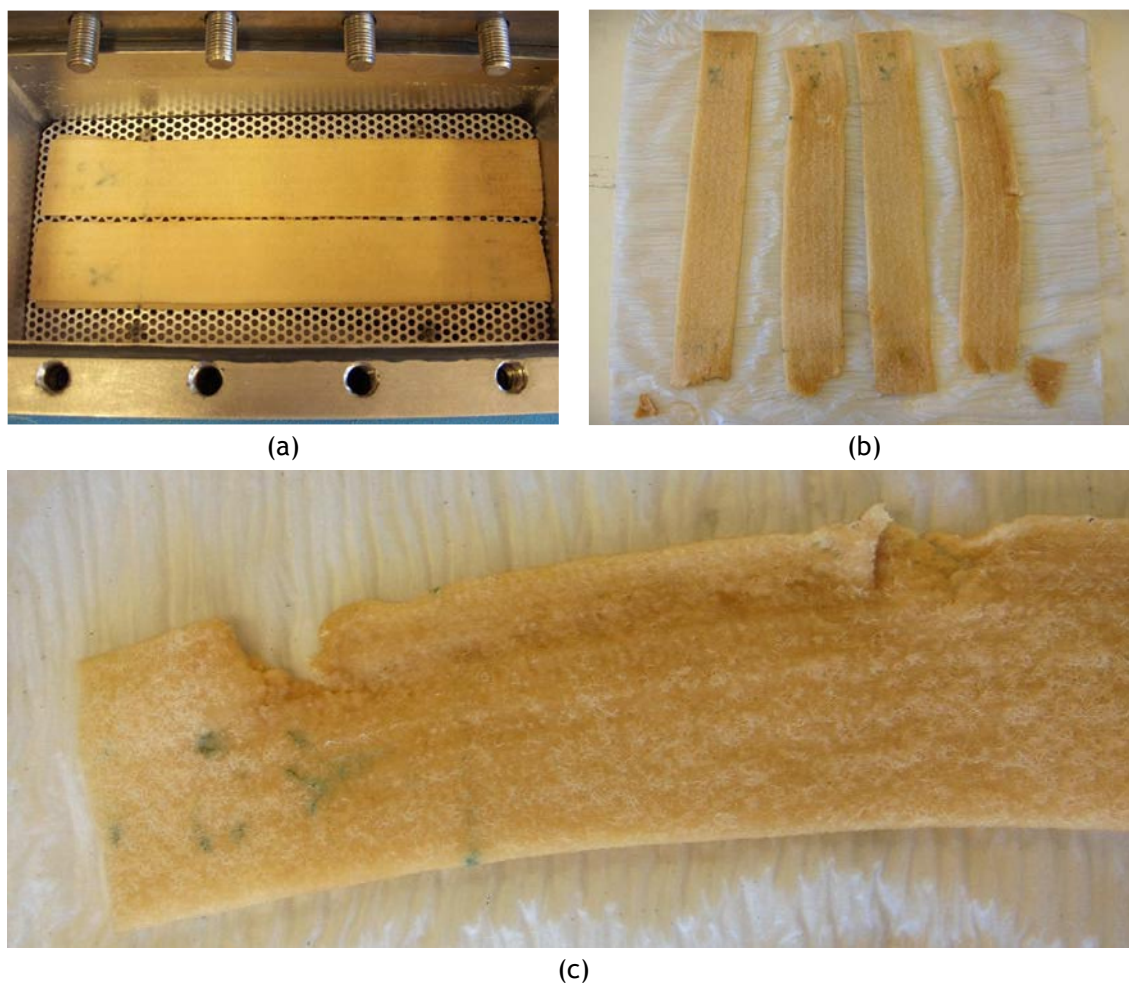


Figura 8.16 - Aspecto do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave:  
(a) provetes no interior do autoclave; (b) aspecto geral dos provetes;  
(c) pormenor dos danos sofridos por um provete.

O aumento do tempo de termo-oxidação provocou ainda mais danos ao geotêxtil B0-500. De facto, após 28 dias de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía uma cor castanha (cor branca aos 7 dias e cor amarela aos 14 dias) e a solução de imersão estava com uma cor amarela/castanha (cor mais escura que a cor constatada aos 14 dias). A solução de imersão libertava um cheiro muito forte a “plástico queimado”. Os provetes estavam muito frágeis e desfaziam-se facilmente em pequenos pedaços ou em pó (foram observadas grandes quantidades de fibras degradadas no interior do autoclave). A Figura 8.17 ilustra o aspecto do geotêxtil B0-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave.

Os ensaios de termo-oxidação realizados no autoclave provocaram danos consideráveis na estrutura do geotêxtil B0-500, afectando seriamente as suas propriedades mecânicas. Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave, encontram-se resumidos no Quadro 8.2. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser observados no Quadro 8.3. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave, estão ilustradas na Figura 8.18.



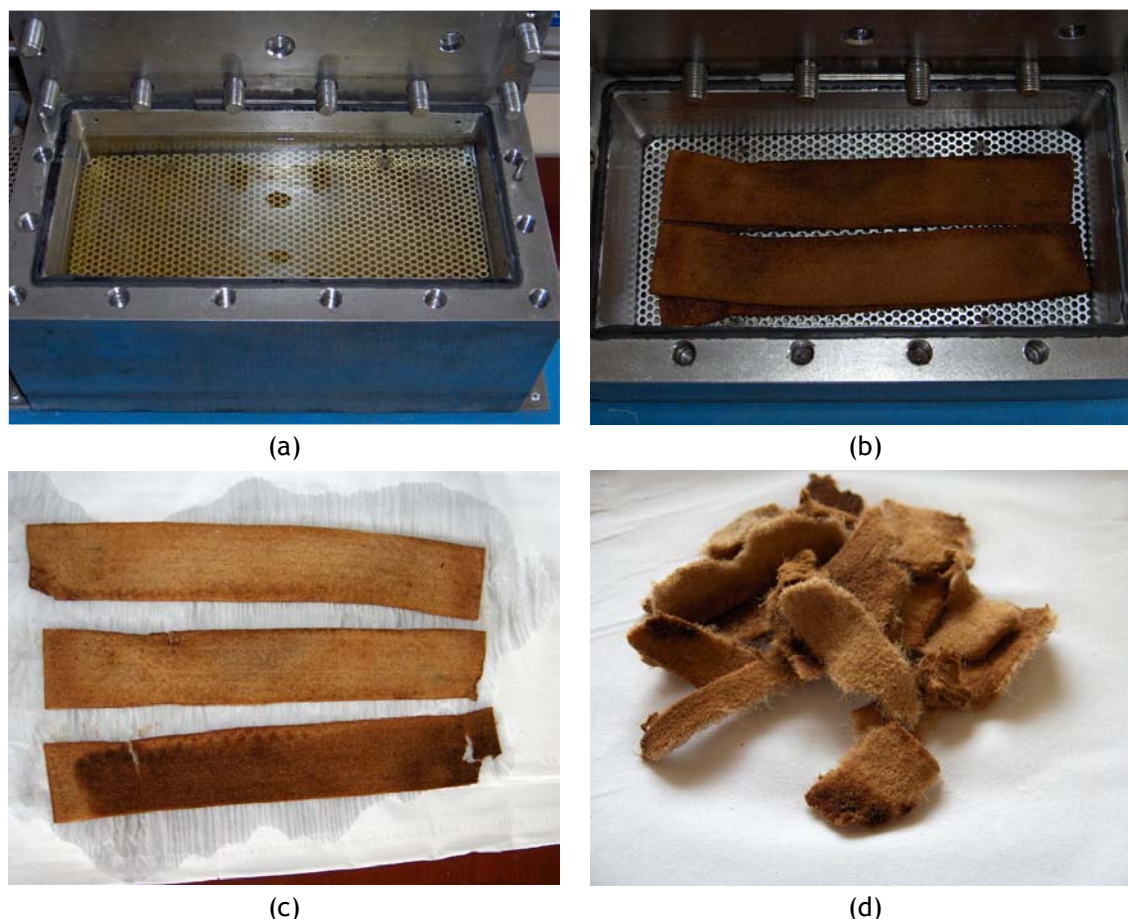


Figura 8.17 - Aspecto do geotêxtil B0-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) provetes no interior do autoclave; (c) aspecto geral dos provetes; (d) provetes transformados em pequenos pedaços.

Quadro 8.2 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 26,2 (14%)                                   | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| 7 Dias  | 8,15 (9,7%)                                  | 22,4 (20%)                   | 31,1                     |
| 14 Dias | 0  | ---                          | 0                        |
| 28 Dias | 0  | ---                          | 0                        |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 8.3 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 27,0  | 30,2  | 31,3   | 35,3   | 1117                            | ---                   |
| 7 Dias  | 26,4  | 37,3  | 40,8   | ---  | 75,4                            | 6,8                   |
| 14 Dias | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | 0                     |
| 28 Dias | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | 0                     |

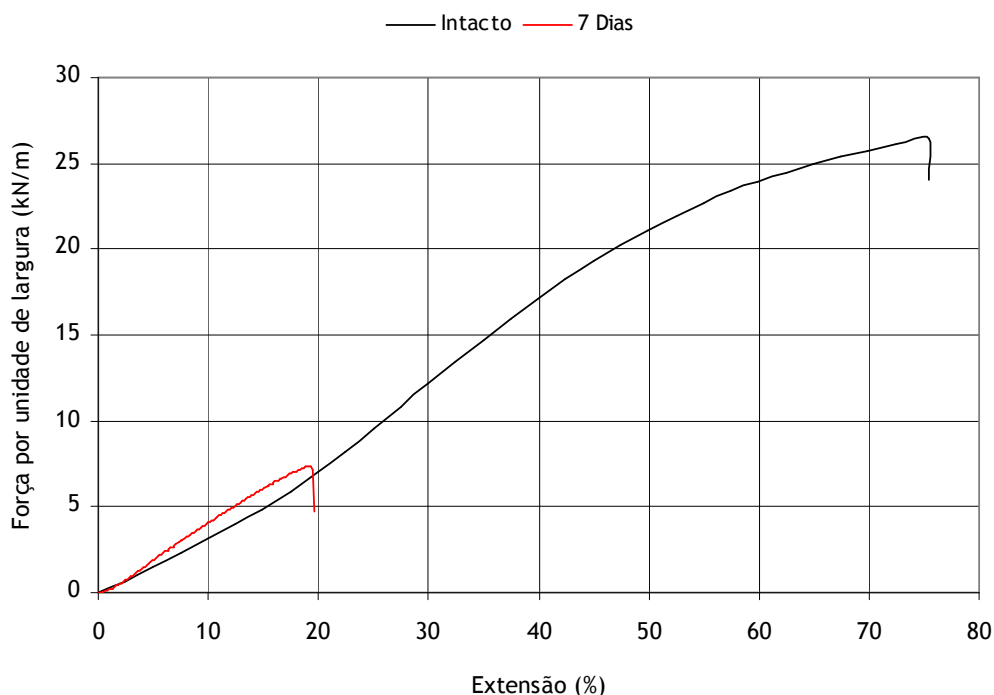


Figura 8.18 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição considerável após os ensaios de termo-oxidação no autoclave. De facto, ao fim dos primeiros 7 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência residual de apenas 31,1%. O aumento do tempo de termo-oxidação de 7 dias para 14 dias provocou uma maior degradação no geotêxtil B0-500 (resistência à tracção nula após 14 dias de termo-oxidação). A extensão na força máxima também diminuiu: ao fim de 7 dias de exposição no autoclave, o geotêxtil B0-500 apresentava uma extensão na força máxima de 22,4% (extensão original de 75,0%).

A robustez do geotêxtil B0-500 sofreu uma grande diminuição após os ensaios de termo-oxidação no autoclave (robustez residual de 6,8% ao fim de 7 dias de termo-oxidação e robustez residual de 0% após 14 dias de termo-oxidação).

A degradação sofrida pelo geotêxtil B0-500 durante os ensaios de termo-oxidação foi caracterizada por MEV. As Figuras 8.19 e 8.20 ilustram algumas imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 7 dias e 14 dias de termo-oxidação no autoclave, respectivamente.

O geotêxtil B0-500 apresentava danos visíveis (tais como fissuras transversais nas suas fibras) após 7 dias de termo-oxidação. O aumento do tempo de termo-oxidação de 7 dias para 14 dias provocou danos mais avultados no geotêxtil B0-500. De facto, ao fim de 14 dias de exposição, as fibras do geotêxtil B0-500 encontravam-se muito mais danificadas (as fissuras eram maiores e mais profundas, algumas fibras estavam quebradas) e muito perto da destruição completa. A degradação observada para as fibras do geotêxtil B0-500 após 28 dias de termo-oxidação (imagens não apresentadas) era muito semelhante à degradação observada após 14 dias de termo-oxidação.

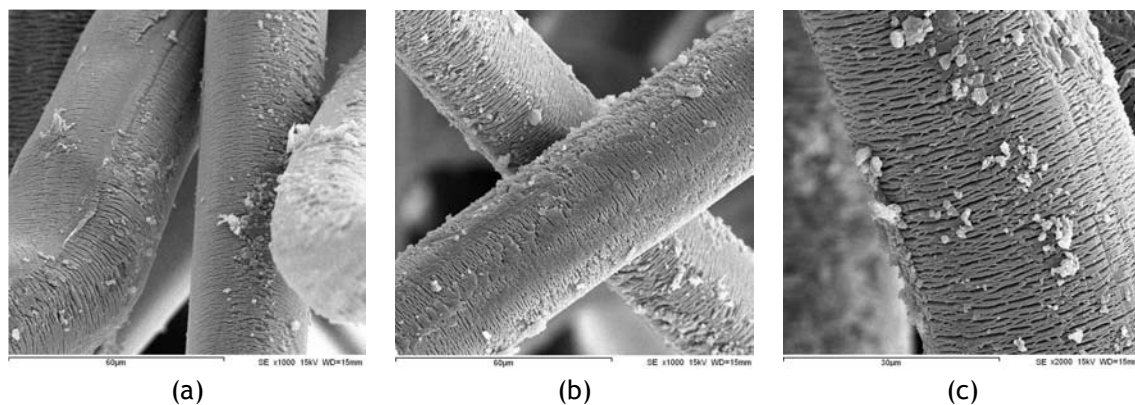


Figura 8.19 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 7 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.

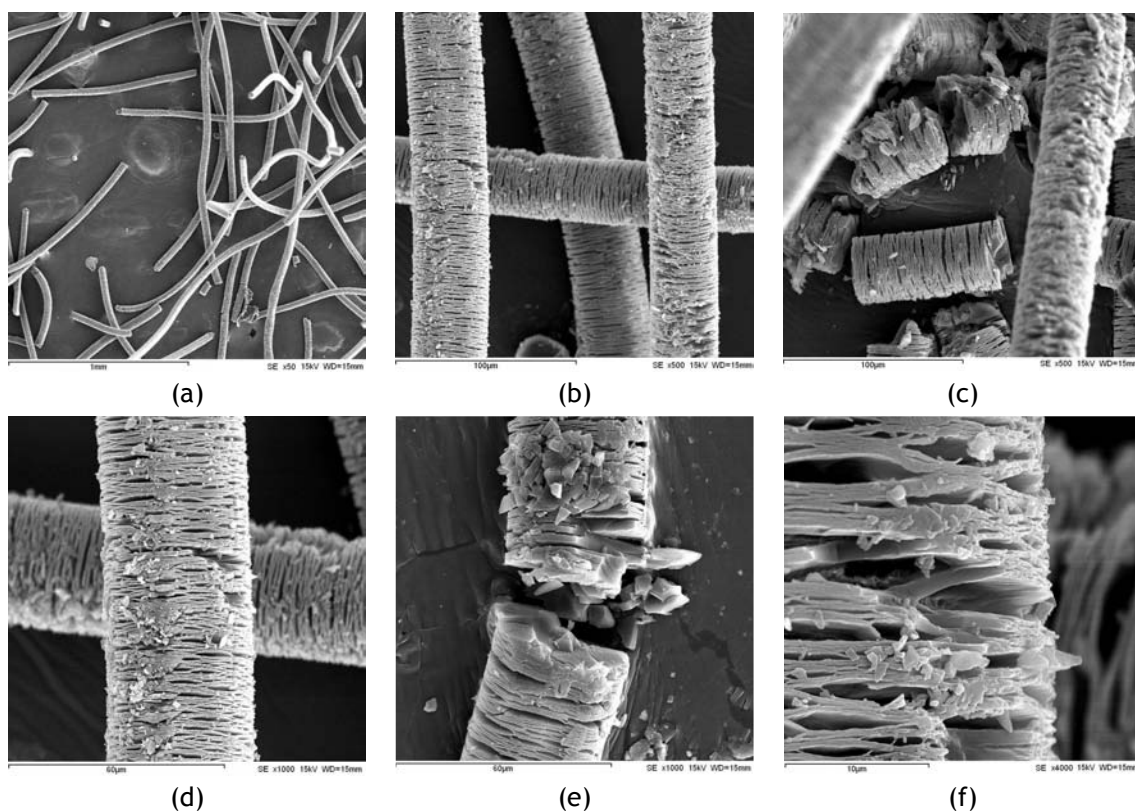


Figura 8.20 - Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B0-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x50; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x4000.

Ao contrário dos ensaios de termo-oxidação pelo método do forno, os ensaios de termo-oxidação no autoclave provocaram, a nível microscópico, vários sinais de degradação no geotêxtil B0-500 (após 14 dias de termo-oxidação pelo método do forno, não foram encontrados danos microscópicos no geotêxtil B0-500 que indicassem que o material estava próximo da destruição total - apenas algumas fibras quebradas). A elevada degradação existente nas fibras do geotêxtil B0-500 está de acordo com a redução da resistência do material ocorrida depois dos ensaios de termo-oxidação através do novo método. Assim, e a nível microscópico, os danos observados após a exposição aos dois métodos de termo-oxidação foram completamente distintos.



### 8.5.4 - Resistência do geotêxtil B2-500 à termo-oxidação

A cor do geotêxtil B2-500 (originalmente branca) não sofreu alteração após 14 dias de exposição aos ensaios de termo-oxidação no autoclave. A solução de imersão manteve a sua cor original (incolor) e não foram notados odores a “plástico queimado”. Os provetes do geotêxtil B2-500 não libertavam fibras danificadas, mas estavam mais macios e aparentavam estar menos resistentes (mais frágeis). A massa dos provetes diminuiu cerca de 8% ao fim de 14 dias de termo-oxidação.

Após 28 dias de termo-oxidação, a solução de imersão estava ligeiramente amarelada e libertava um odor característico a “plástico queimado”. Os provetes do geotêxtil B2-500 também possuíam uma cor ligeiramente amarelada e libertavam algumas fibras danificadas (o que, desde logo, indicou a existência de danos na estrutura polimérica do material). A massa dos provetes diminuiu cerca de 10% ao fim de 28 dias de termo-oxidação. A Figura 8.21 ilustra o aspecto do geotêxtil B2-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave.

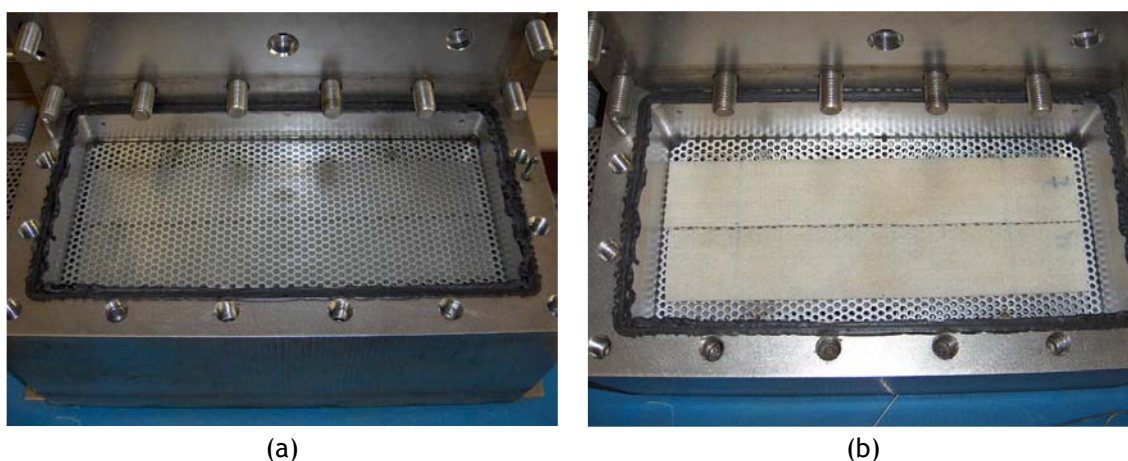


Figura 8.21 - Aspecto do geotêxtil B2-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) aspecto geral da solução de imersão; (b) aspecto geral dos provetes.

O Quadro 8.4 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 8.5. A Figura 8.22 ilustra as curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, obtidas antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

Quadro 8.4 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| 14 Dias | 13,0 (4,4%)                                  | 35,8 (5,9%)                  | <b>48,9</b>              |
| 28 Dias | 9,99 (11,1%)                                 | 32,8 (7,7%)                  | <b>37,6</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 8.5 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|--|--|---|---|-----------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 32,5   | 35,1   | 35,9  | 40,0  | 1076                              | ---                   |
| 14 Dias | 22,0   | 35,0   | 39,7  | 40,3  | 225                               | <b>20,9</b>           |
| 28 Dias | 17,5   | 28,3   | 33,0  | 33,8  | 153                               | <b>14,2</b>           |

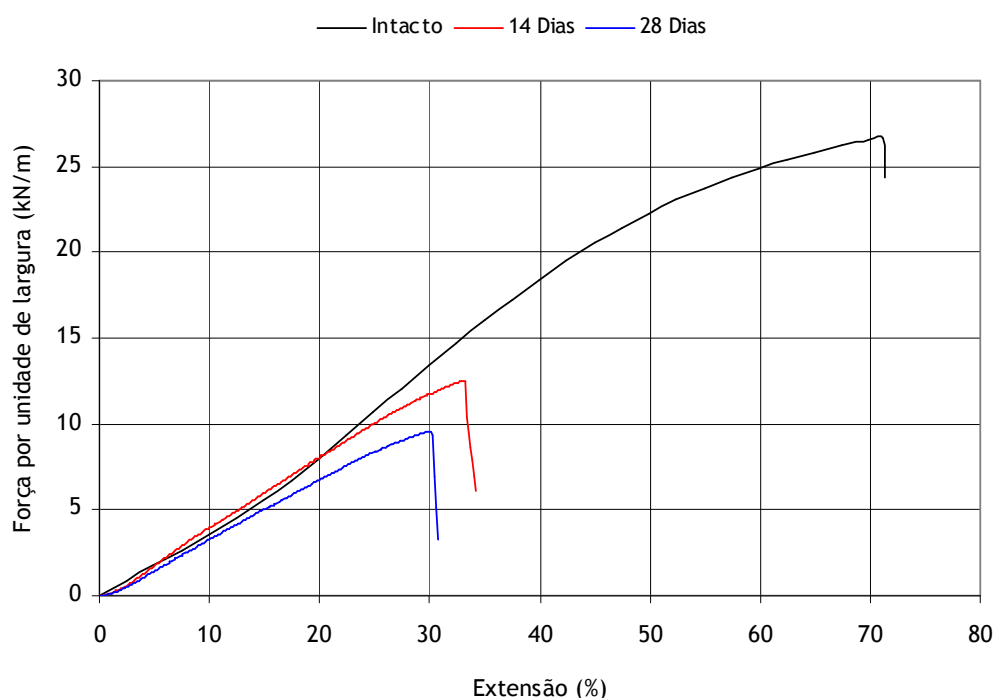


Figura 8.22 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-500 sofreu uma diminuição após a exposição aos ensaios de termo-oxidação no autoclave. Ao fim de 14 dias de exposição, o geotêxtil B2-500 apresentava uma resistência residual de 48,9% (confirmando a redução de resistência indiciada através da inspecção sensorial dos provetes). O aumento do tempo de exposição de 14 dias para 28 dias provocou uma diminuição adicional na resistência à tracção do geotêxtil B2-500 (resistência residual de 37,6% após 28 dias de termo-oxidação).

A extensão na força máxima do geotêxtil B2-500 também sofreu uma diminuição após os ensaios no autoclave. Ao fim de 14 dias e 28 dias de termo-oxidação, o geotêxtil B2-500 possuía extensões na força máxima de 35,8% e de 32,8%, respectivamente (extensão original de 71,6%).

A robustez do geotêxtil B2-500 diminuiu após os ensaios de termo-oxidação no autoclave. Ao fim de 14 dias de exposição, o geotêxtil B2-500 apresentava uma robustez residual de 20,9%. O aumento do tempo de exposição provocou uma diminuição da robustez do geotêxtil B2-500 (robustez residual de 14,2% após 28 dias de termo-oxidação). Os valores da rigidez secante do geotêxtil B2-500 depois de 28 dias de termo-oxidação foram ligeiramente inferiores aos valores de referência.

Os danos sofridos pelo geotêxtil B2-500 durante os ensaios de termo-oxidação foram caracterizados por MEV. As Figuras 8.23 e 8.24 ilustram algumas imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 14 dias e 28 dias de termo-oxidação no autoclave, respectivamente.

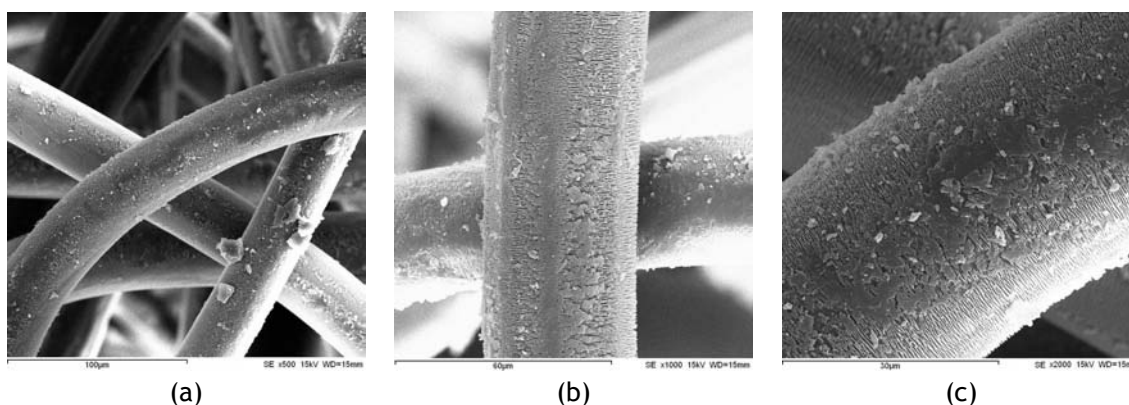


Figura 8.23 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 14 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

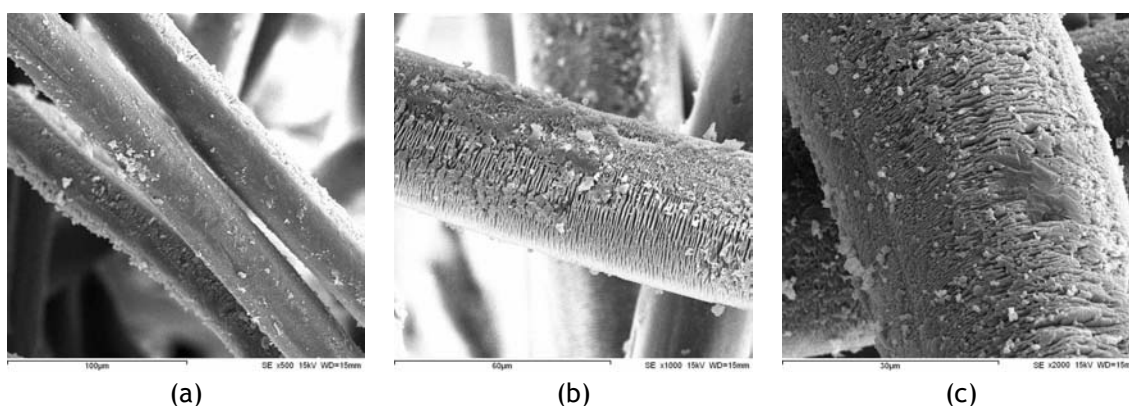


Figura 8.24 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

As fibras do geotêxtil B2-500 apresentavam danos visíveis (tais como fissuras transversais) ao fim de 14 dias de termo-oxidação no autoclave. O aumento do tempo de exposição para 28 dias provocou mais danos nas fibras do geotêxtil B2-500: as fissuras tornaram-se mais largas e profundas e algumas fibras começaram a perder pequenos pedaços de material polimérico. A degradação ocorrida nas fibras do geotêxtil B2-500 após 14 dias de termo-oxidação foi muito menor que a degradação sofrida pelas fibras do geotêxtil B0-500.

#### 8.5.5 - Resistência do geotêxtil B4-500 à termo-oxidação

O geotêxtil B4-500 não apresentava nenhuns sinais de degradação após 14 dias de termo-oxidação (a cor dos provetes e a cor da solução de imersão não sofreram alterações, não foram notados odores a “plástico queimado” e os provetes não libertavam pequenos pedaços de fibras danificadas). A massa dos provetes do geotêxtil B4-500 diminuiu cerca de 1% ao fim de 14 dias de termo-oxidação (nas mesmas condições, a massa dos provetes do geotêxtil B2-500 diminuiu cerca de 8%).

Após 28 dias de exposição, a solução de imersão estava ligeiramente amarelada. No entanto, a cor dos provetes do geotêxtil B4-500 não sofreu nenhuma alteração e não foram perceptíveis nenhuns odores a “plástico queimado”. A massa dos provetes do geotêxtil B4-500 diminuiu cerca de 4% ao fim de 28 dias de termo-oxidação (nas mesmas condições, diminuição de cerca de 10% nos provetes do geotêxtil B2-500).

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios no autoclave, estão resumidos no Quadro 8.6. Os valores obtidos para a rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se no Quadro 8.7. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios no autoclave, estão representadas na Figura 8.25.

Quadro 8.6 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 27,6 (6,1%)                                 | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| 14 Dias | 28,2 (19%)                                  | 52,7 (5,0%)                  | <b>102</b>               |
| 28 Dias | 14,9 (20%)                                  | 33,6 (2,1%)                  | <b>54,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 8.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 33,3                                      | 36,1                                      | 36,9                                       | 40,3                                       | 1188                           | ---                   |
| 14 Dias | 39,0                                      | 52,4                                      | 57,4                                       | 61,2                                       | 846                            | <b>71,2</b>           |
| 28 Dias | 27,0                                      | 41,2                                      | 46,2                                       | 48,0                                       | 262                            | <b>22,1</b>           |

A resistência à tracção do geotêxtil B4-500 não diminuiu após 14 dias de termo-oxidação (resistência residual de 102%). No entanto, o aumento do tempo de exposição de 14 dias para 28 dias provocou uma diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B4-500 (resistência residual de 54,0% ao fim de 28 dias de termo-oxidação).

A extensão na força máxima do geotêxtil B4-500 diminuiu após os ensaios de termo-oxidação. Ao fim de 14 dias de ensaio (e embora a resistência à tracção não tenha sofrido variações significativas), a extensão na força máxima do geotêxtil B4-500 diminuiu de 74,1% para 52,7%. O aumento do tempo de exposição provocou uma diminuição adicional da extensão na força máxima do geotêxtil B4-500 (extensão na força máxima de 33,6% após 28 dias de termo-oxidação).

A robustez do geotêxtil B4-500 também diminuiu à medida que o tempo de exposição aumentou. De facto, a robustez residual do geotêxtil B4-500 diminuiu dos 71,2% (após 14 dias de exposição) para os 22,1% (ao fim de 28 dias de exposição). De um modo geral, os valores da rigidez secante dos provetes expostos foram superiores aos valores da rigidez secante dos provetes de referência.

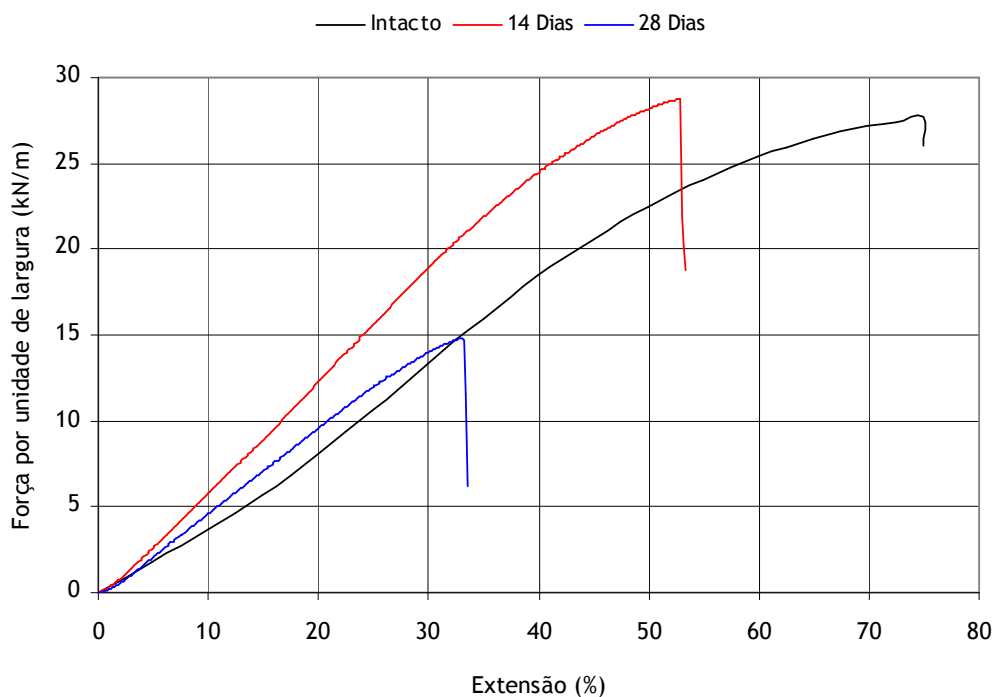


Figura 8.25 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

Os danos sofridos pelo geotêxtil B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação foram avaliados por MEV. A Figura 8.26 ilustra algumas imagens obtidas por MEV para o geotêxtil B4-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave.

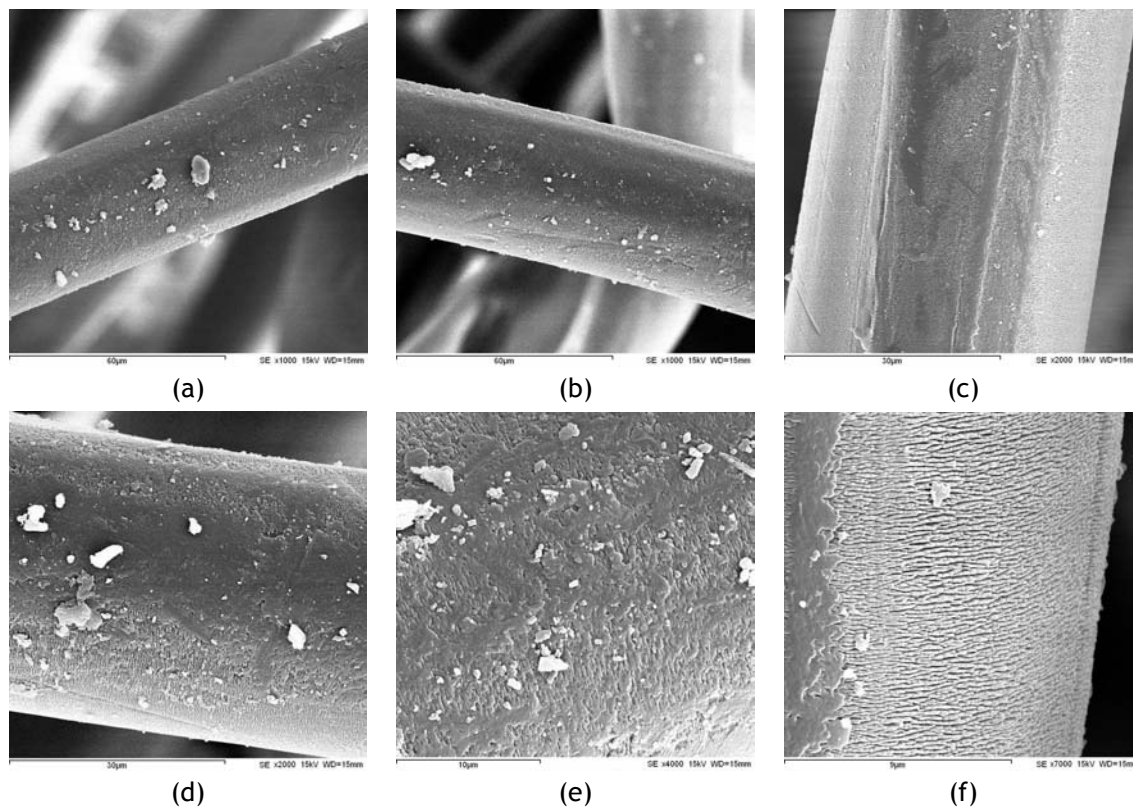


Figura 8.26 - Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B4-500 após 28 dias de termo-oxidação no autoclave: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000; (d) x2000; (e) x4000; (f) x7000.

A análise por MEV mostrou que as fibras do geotêxtil B4-500 não apresentavam danos evidentes após 14 dias de termo-oxidação. O aumento do tempo de exposição provocou o aparecimento de danos visíveis (pequenas fissuras transversais) nas fibras do geotêxtil B4-500. No entanto, a existência de danos nas fibras do geotêxtil B4-500, ao fim de 28 dias de termo-oxidação, foi apenas identificada através da observação do material a ampliações relativamente elevadas (a existência de danos nas fibras do geotêxtil B4-500 não era facilmente perceptível com ampliações de 1000 vezes). As fibras com 0,4% de C944 estavam muito menos danificadas do que as fibras com 0,2% de C944 (o que está de acordo com os resultados mecânicos obtidos).

A degradação dos geotêxteis de PP iniciou-se pelo aparecimento de pequenas fissuras transversais nas suas fibras (que aumentam de tamanho à medida que aumenta o tempo de termo-oxidação). A resistência dos geotêxteis vai diminuindo à medida que essas fissuras se tornam mais largas e mais profundas (até ao momento em que as fibras quebram e ficam reduzidas a pequenos pedaços ou a pó). A incorporação do aditivo C944 foi importante para retardar o aparecimento dessas fissuras e, assim, aumentar a resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação.

#### 8.5.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação

Os geotêxteis com C944 (B2-500 e B4-500) não foram completamente destruídos durante os ensaios de termo-oxidação através do novo método, o que, desde logo, mostrou a importância do C944 na protecção das fibras de PP contra os danos provocados pela termo-oxidação (na ausência do aditivo, os materiais estariam praticamente destruídos após 14 dias de termo-oxidação). Assim, a resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação aumentou consideravelmente pela incorporação de C944 nos materiais.

A Figura 8.27 compara a evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 nos ensaios de termo-oxidação. A Figura 8.28 ilustra uma comparação similar para a robustez residual.

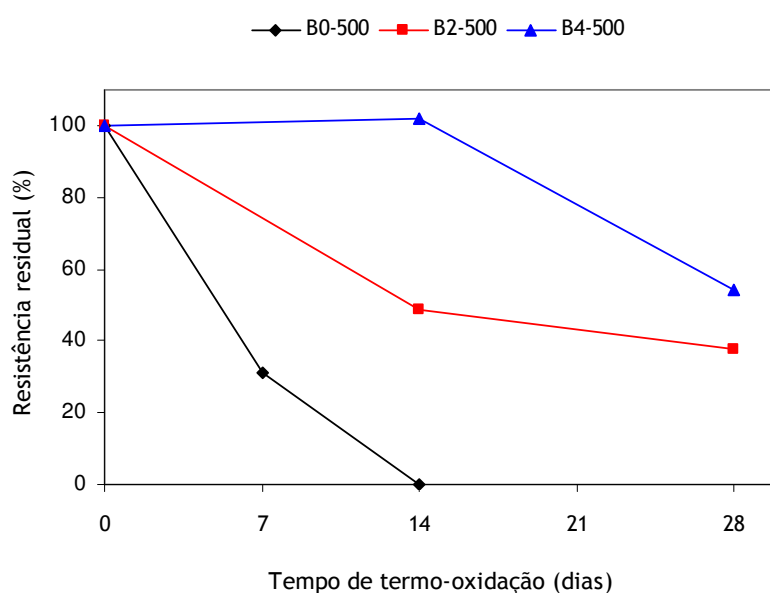


Figura 8.27 - Evolução da resistência residual dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação no autoclave.



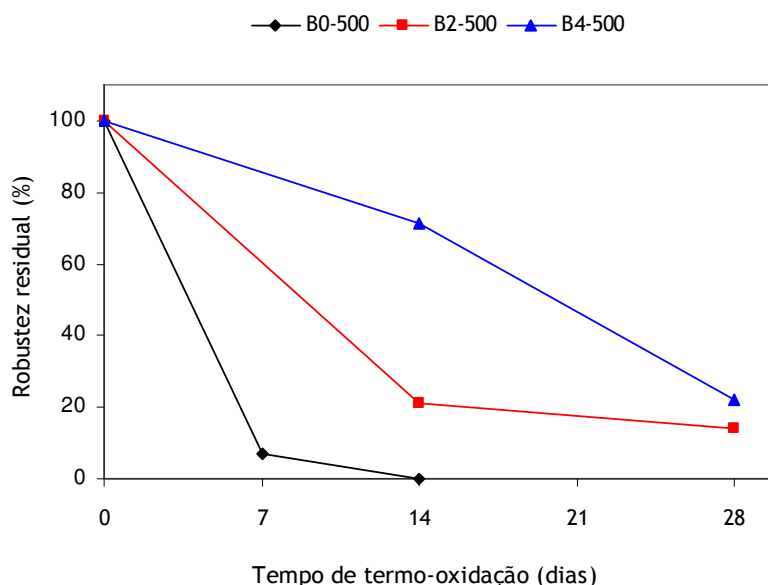


Figura 8.28 - Evolução da robustez residual dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação no autoclave.

A degradação sofrida pelo geotêxtil B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação foi menor do que a degradação ocorrida no geotêxtil B2-500. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos geotêxteis contra a degradação induzida pela termo-oxidação.

Os ensaios de termo-oxidação realizados através do novo método permitiram distinguir, em termos de resistência à oxidação, e num intervalo de tempo relativamente pequeno, três geotêxteis de PP com diferentes estabilizações: o geotêxtil B0-500 (não estabilizado), o geotêxtil B2-500 (com 0,2% de C944) e o geotêxtil B4-500 (com 0,4% de C944) (é importante relembrar que através do método do forno não foi possível distinguir, em termos de resistência à oxidação, e num intervalo de tempo suficientemente pequeno, o geotêxtil B2-500 do geotêxtil B4-500).

O novo método de ensaio é bastante simples, barato, de fácil execução e permite obter resultados num curto espaço de tempo. Além disso, permite distinguir, em termos de resistência à oxidação, materiais que não foram distinguidos pelo método do forno. Deste modo, o novo método de ensaio pode ser uma alternativa e/ou um complemento aos métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.

## 8.6 - Resistência dos geotêxteis à termo-oxidação: o novo método vs o método do forno

O geotêxtil B0-500 degradou-se por completo, num intervalo de tempo relativamente curto, quando exposto ao ensaio de termo-oxidação por ambos os métodos (degradação completa após 9 dias pelo método do forno a 110 °C e após 14 dias no autoclave a 80 °C). Relembrando que foram necessários 71 dias para a degradação completa do geotêxtil B0-280 pelo método do forno a 80 °C (Capítulo 7) e tendo em conta que não foram encontrados nenhuns indícios que a massa por unidade de área tenha alguma importância na degradação sofrida pelos materiais durante o ensaio pelo método do forno,

então, é de esperar que o tempo necessário para a degradação completa do geotêxtil B0-500 (a 80 °C e pelo método do forno) seja muito semelhante ao tempo necessário para a degradação completa do geotêxtil B0-280. Assim, e para a mesma temperatura de 80 °C, a degradação causada pelo novo método de ensaio ocorre mais rapidamente que a degradação provocada pelo método do forno.

A resistência à termo-oxidação dos geotêxteis com C944 foi diferente quanto os materiais foram ensaiados pelo novo método e pelo método do forno. A resistência à tracção dos geotêxteis B2-500 e B4-500 não sofreu alterações significativas após a exposição à termo-oxidação pelo método do forno durante 56 dias a 110 °C (não foram encontrados indícios da ocorrência de degradação). No entanto, a exposição à termo-oxidação pelo novo método (a 80 °C) provocou uma diminuição considerável da resistência à tracção dos dois materiais (e foram observados danos nas suas fibras). Assim, os danos causados pelos 28 dias de exposição, a 80 °C, no autoclave foram superiores aos danos provocados pela exposição durante 56 dias pelo método do forno a 110 °C. A Figura 8.29 compara a resistência residual do geotêxtil B4-500 após a exposição à termo-oxidação, a 80 °C, através do novo método e através do método do forno.

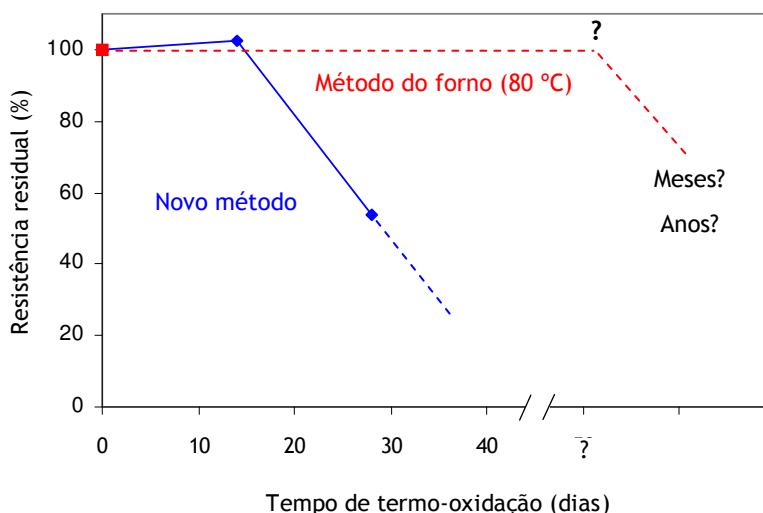


Figura 8.29 - Evolução da resistência residual do geotêxtil B4-500 durante os ensaios de termo-oxidação a 80 °C: novo método vs método do forno.

O novo método permitiu distinguir a resistência à termo-oxidação dos geotêxteis com diferentes teores de C944 (0,2% e 0,4%), o que não foi possível através do método do forno. A resistência dos geotêxteis B2-500 e B4-500 à termo-oxidação poderá também ser distinguida através do método do forno, mas serão necessários intervalos de exposição muito elevados (vários meses ou anos), o que é impeditivo quando se pretender distinguir em tempo útil (alguns dias ou semanas) a resistência à termo-oxidação de materiais com diferentes estabilizações.

O novo método é mais agressivo para os geotêxteis de PP do que o método do forno, causando uma maior degradação num menor intervalo de tempo. No novo método, os geotêxteis são expostos a um meio fortemente oxidante (elevada pressão de oxigénio), o que provavelmente acelera o consumo de C944, desprotegendo assim os materiais contra os efeitos da oxidação. Além disso, a imersão dos geotêxteis em meio líquido poderá também originar perdas do aditivo por extracção.



O novo método é uma boa alternativa e/ou um complemento aos métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. A reunião das informações obtidas pelos diferentes métodos de ensaio certamente permitirá uma melhor avaliação (mais exacta e fiável) da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.

### **8.7 - Considerações finais**

Neste capítulo, procedeu-se à descrição de um novo equipamento (protótipo) e método para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. No novo método, os geossintéticos são imersos, a temperaturas elevadas, numa solução de peróxido de hidrogénio. A elevada pressão atingida dentro do equipamento (autoclave) é obtida pela decomposição do peróxido de hidrogénio em água e em oxigénio. O novo equipamento e método foram utilizados para avaliar a resistência dos geotêxteis à termo-oxidação; os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos pelo método do forno (Capítulo 7).

O novo método é bastante simples, barato, de fácil execução experimental e permite a obtenção de resultados num pequeno intervalo de tempo (alguns dias ou semanas). Assim, poderá ser uma boa opção para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação.



# CAPÍTULO 9

## Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados artificialmente

### 9.1 - Introdução

Os geossintéticos expostos ao ar livre estão permanentemente sujeitos à acção de diversos agentes climáticos (tais como: radiação solar, variações de temperatura, chuva, humidade, gelo, vento, poluentes atmosféricos, entre outros). A exposição prolongada aos vários agentes climáticos pode afectar negativamente as propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos (afectando o seu desempenho e provocando uma diminuição drástica da sua durabilidade). Assim, é muito importante avaliar qual a resistência dos geossintéticos aos diversos agentes climáticos.

A resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos pode ser avaliada através da exposição dos materiais ao ar livre (sob condições reais) ou em simuladores laboratoriais (sob condições simuladas artificialmente). Os ensaios de exposição sob condições reais são normalmente muito demorados (na maioria dos casos, vários meses ou anos). Assim, os simuladores laboratoriais são frequentemente utilizados para tentar reproduzir, num intervalo de tempo relativamente pequeno (alguns dias ou semanas), os danos sofridos pelos materiais quando expostos sob condições reais durante um longo período de tempo.

Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis a diversos agentes climáticos simulados artificialmente (radiação UV, chuva e orvalho). Os geotêxteis foram expostos a diferentes ensaios climáticos (com diferentes condições experimentais) num simulador laboratorial - o QUV. Após os ensaios, as propriedades dos provetes expostos foram comparadas com as propriedades dos provetes de referência.

A resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos foi também avaliada após uma imersão prévia dos materiais em ácidos (ácido sulfúrico e ácido nítrico), em bases (hidróxido de sódio), em água, em cloreto de sódio e em soluções de vários cations metálicos (cádmio, cobre, ferro e zinco). Assim, foi possível determinar qual o efeito das várias soluções químicas na resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos simulados em laboratório.

Na parte final do capítulo, procede-se à avaliação do grau de foto-degradação dos geotêxteis por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e à determinação do teor de C944 nos geotêxteis por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção UV.

## 9.2 - Descrição geral dos ensaios climáticos

Os geotêxteis foram expostos aos agentes climáticos artificiais num simulador laboratorial - o QUV (marca *Q-Panel Lab Products*, modelo *QUV/spray*) (Figura 9.1). O QUV permite expor os materiais a ciclos climáticos artificiais com passos de chuva, de condensação (simulam o efeito do orvalho e da humidade) e de exposição à radiação UV (simulam o efeito da luz solar). Os passos de exposição à radiação UV e de condensação são normalmente realizados a temperaturas elevadas, de modo a acelerar o processo de degradação e permitir, assim, a obtenção de resultados num curto intervalo de tempo. Deste modo, a simulação laboratorial da acção dos agentes climáticos pode ser usada para prever o comportamento dos geotêxteis quando expostos no exterior sob condições reais.



Figura 9.1 - Simulador climático QUV: (a) Aspecto exterior do QUV; (b) QUV antes da colocação dos suportes com os geotêxteis (lâmpadas UV); (c) QUV após a colocação dos suportes com os geotêxteis; (d) suportes usados para a colocação dos geotêxteis.

A radiação UV existente na luz solar foi simulada através de lâmpadas fluorescentes do tipo UVA-340 (passo de exposição à radiação UV). As lâmpadas UVA-340 fornecem uma simulação muito boa da luz solar entre os 350 nm e os 295 nm (menor comprimento de onda existente na luz solar que atinge a superfície terrestre), possuindo um máximo de emissão aos 340 nm (Figura 9.2). As lâmpadas usadas no QUV são electricamente muito idênticas às lâmpadas fluorescentes convencionais, mas produzem essencialmente radiação UV, em vez de radiação visível ou infravermelha.

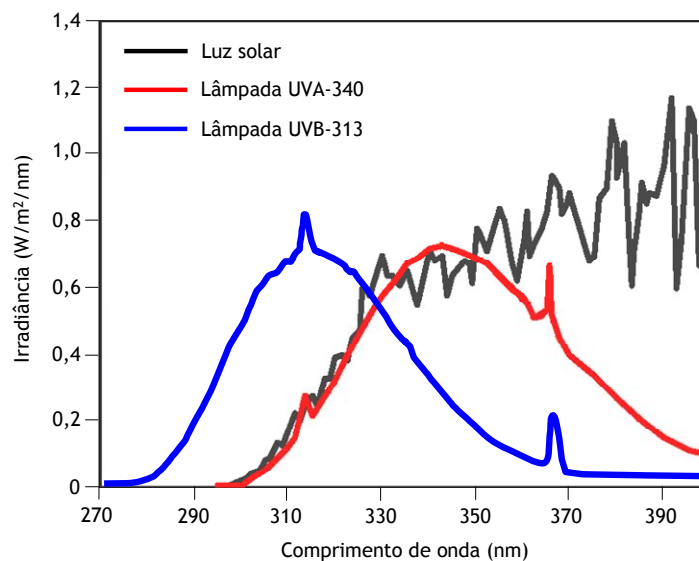


Figura 9.2 - Distribuição espectral (na região UV) da luz solar, das lâmpadas UVA-340 e das lâmpadas UVB-313 (lâmpadas em condições normais de operação).

O passo de exposição à radiação UV pode também ser efectuado com lâmpadas UVB. Estas lâmpadas emitem energia a menores comprimentos de onda do que os encontrados na luz solar, o que pode acelerar o processo de degradação dos materiais em relação às lâmpadas UVA (as lâmpadas UVA e UVB diferem na quantidade de energia emitida e na distribuição espectral). No entanto, o facto das lâmpadas UVB emitirem energias maiores que as encontradas na luz solar pode originar resultados anómalos (os resultados obtidos com lâmpadas UVA e UVB podem diferir significativamente). Assim, as lâmpadas UVA permitem uma melhor simulação da radiação UV que atinge os materiais expostos em condições reais.

As lâmpadas UVA-340 possuem um máximo de emissão aos 340 nm e podem emitir uma irradiância (potência radiante por unidade de área) máxima de  $1,38 \text{ W.m}^{-2}$  (em condições normais de operação, a irradiância das lâmpadas UVA-340 possui um valor de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm). A radiação emitida pelas lâmpadas UVA-340 durante o passo de exposição UV é seleccionada pelo operador. A utilização de irradiâncias altas poderá acelerar o processo de degradação dos materiais, mas poderá também dificultar a obtenção de boas correlações com os resultados obtidos sob condições reais. Além disso, o uso de irradiâncias elevadas provoca uma diminuição significativa do tempo de vida das lâmpadas.

As lâmpadas UV (8 lâmpadas) são continuamente monitorizadas e controladas através de um sistema existente no QUV (designado por *Solar Eye*). O controlador monitoriza a irradiância das lâmpadas através de 4 sensores localizados junto às amostras (2 sensores em cada lado do QUV; cada sensor monitoriza 2 lâmpadas). A existência de variações na irradiância é compensada através do ajuste da intensidade das lâmpadas. A irradiância mensurada por cada um dos sensores é indicada no painel frontal do equipamento (os 4 valores devem ser idênticos ao valor definido pelo operador). Por cada 400 horas de operação, é necessário efectuar a calibração das lâmpadas UV (calibração feita através de um equipamento próprio - *CR10 Calibration Radiometer*, marca *Q-Panel Lab Products*). A Figura 9.3 ilustra os sensores e o painel de informação do sistema *Solar Eye*.

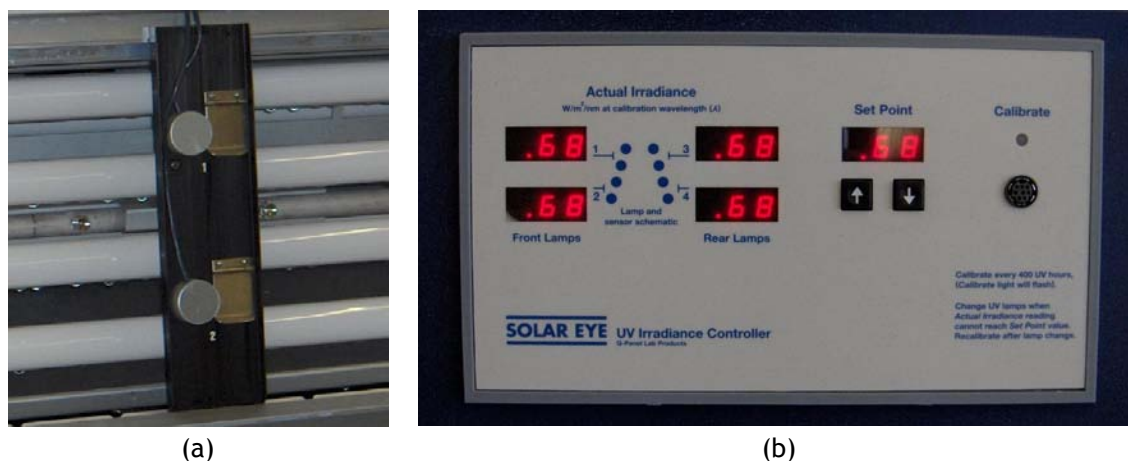


Figura 9.3 - Sistema de controlo das lâmpadas do QUV (sistema *Solar Eye*):  
(a) sensores de monitorização das lâmpadas UV; (b) painel de informação do sistema.

O efeito da chuva foi simulado pela projecção de jactos de água (tipo chuveiro) contra a superfície dos materiais. O sistema de projecção de água é constituído por 12 aspersores (6 em cada lado do QUV) montados entre as lâmpadas do equipamento (Figura 9.4). A água usada para simular o efeito da chuva foi purificada através de um sistema de osmose inversa com tratamento microbiológico, seguido de desionização em resinas de permuta iónica de leito misto. A água foi projectada com um fluxo de  $5 \text{ L.min}^{-1}$  (água à temperatura ambiente). O passo de chuva origina uma diminuição brusca da temperatura dos materiais (choque térmico) e pode promover a erosão da sua superfície (através da remoção de fibras degradadas).

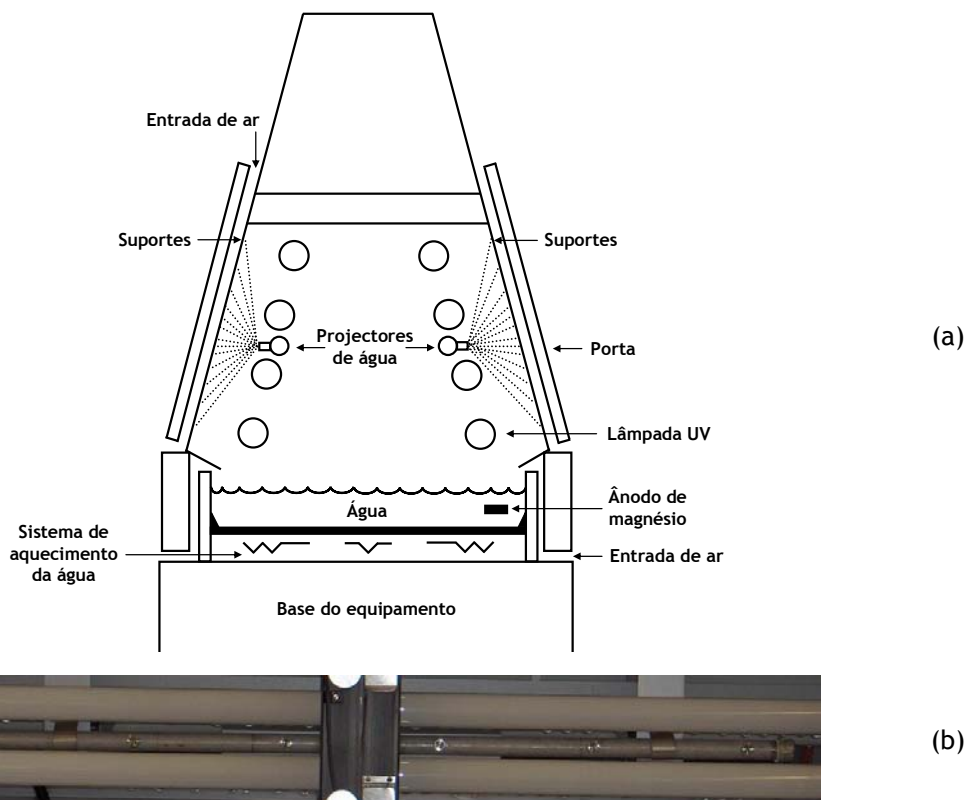


Figura 9.4 - Sistema de projecção de água existente no QUV:  
(a) esquema do sistema em operação; (b) aspersores localizados entre as lâmpadas UV.

Durante o passo de condensação, a água (proveniente da rede de abastecimento pública) existente num reservatório localizado no fundo do QUV é aquecida, ocorrendo a formação de vapor de água, que vai condensar (água destilada) à superfície dos materiais expostos (Figura 9.5). Os suportes das amostras formam as paredes laterais da câmara de teste e impedem a saída do vapor de água para o exterior. A porta que cobre os suportes não fecha por completo, permitindo a circulação de ar (frio) nas traseiras dos suportes, refrigerando-os para uma temperatura abaixo da temperatura do vapor e provocando, assim, a condensação de água (que depois regressa ao reservatório).

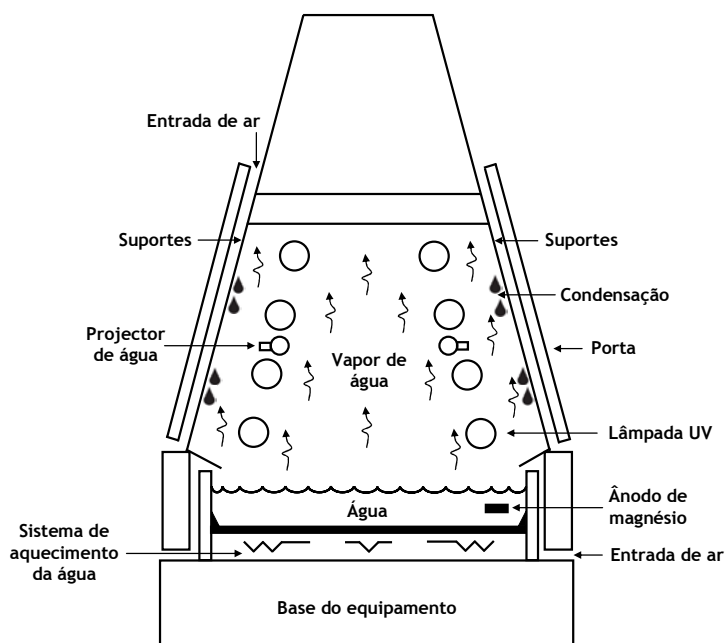


Figura 9.5 - Esquema do sistema de condensação existente no QUV.

Os provetes foram expostos no QUV a ciclos com passos de exposição à radiação UV, de chuva e de condensação. Os provetes expostos (pelo menos 6 provetes) possuíam 400 mm de comprimento e 50 mm de largura (dimensões compatíveis com os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3).

Após a exposição, os provetes foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz por um período mínimo de 7 dias. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3 (método de ensaio descrito no ponto 4.6). As alterações microscópicas ocorridas nos materiais foram analisadas por MEV.

O grau de foto-degradação dos geotêxteis expostos foi avaliado por FTIR. O teor de C944 existente nos materiais expostos foi determinado por HPLC-UV. As análises cromatográficas e as análises por espectroscopia de infravermelho foram apenas realizadas para alguns geotêxteis expostos.

As características particulares (temperatura, tempo, irradiância, composição dos ciclos) de cada um dos ensaios climáticos realizados serão descritas mais à frente, antes da apresentação e discussão dos principais resultados obtidos.

### 9.3 - Resultados experimentais

#### 9.3.1 - Efeito da composição do ciclo climático na resistência dos geotêxteis

##### 9.3.1.1 - Características particulares dos ensaios

Os geotêxteis foram expostos a 5 ensaios climáticos diferentes (designados por E08, E26, E44, E62 e E80) com a mesma duração total (500 horas). Os ensaios climáticos eram constituídos por vários ciclos (designados por C08, C26, C44, C62 e C80) com diferentes durações dos passos de exposição à radiação UV (60 °C) e de condensação (45 °C) (o ciclo C08 corresponde ao ciclo usado no ensaio E08, e assim por diante para os restantes ciclos). O passo de chuva teve uma duração de 10 minutos em todos os ciclos climáticos. As características comuns aos vários ciclos climáticos encontram-se resumidas no Quadro 9.1.

Quadro 9.1 - Características comuns aos ciclos climáticos C08, C26, C44, C62 e C80.

|   |
|---|
| Passo 1: Exposição à radiação UV (60 °C) (duração variável) |
| Passo 2: Chuva (choque térmico) (10 minutos)                |
| Passo 3: Condensação (45 °C) (duração variável)             |
| (retorno ao passo 1)  |

Do ciclo C08 para o ciclo C80, o tempo do passo de exposição à radiação UV aumentou e o tempo do passo de condensação diminuiu (Quadro 9.2). As designações atribuídas aos diferentes ciclos contêm informação sobre a duração dos passos de exposição UV e de condensação: o primeiro algarismo é o tempo (em horas) do passo de exposição UV, enquanto que o segundo algarismo indica o tempo do passo de condensação. Por exemplo, no ciclo C26, o passo de exposição UV possui uma duração de 2 horas e o passo de condensação possui uma duração de 6 horas. Nas 500 horas totais do ensaio, os geotêxteis foram expostos a cerca de 61 ciclos climáticos (cada ciclo possui 8 horas e 10 minutos).

Quadro 9.2 - Duração dos passos de exposição à radiação UV, de chuva e de condensação nos diferentes ciclos climáticos.

| Ciclo climático | Passo de exposição UV (horas) | Passo de chuva (minutos) | Passo de condensação (horas) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| C08             | 0                             | 10                       | 8                            |
| C26             | 2                             |                          | 6                            |
| C44             | 4                             |                          | 4                            |
| C62             | 6                             |                          | 2                            |
| C80             | 8                             |                          | 0                            |

A irradiância durante o passo de exposição UV foi de 0,68 W.m<sup>-2</sup> aos 340 nm (1W = 1J.s<sup>-1</sup>). O Quadro 9.3 resume os valores da radiação incidente total (irradiância integrada sobre o intervalo de tempo de irradiação, expressa em MJ.m<sup>-2</sup>) durante as 500 horas de ensaio.



Quadro 9.3 - Radiação total incidente (500 horas) durante os diferentes ensaios climáticos.

| Ensaio climático | Radiação incidente total (340 nm) | Radiação incidente total (290-400 nm) |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| E08              | 0 MJ.m <sup>-2</sup>              | 0 MJ.m <sup>-2</sup>                  |
| E26              | 0,30 MJ.m <sup>-2</sup>           | 17,28 MJ.m <sup>-2</sup>              |
| E44              | 0,60 MJ.m <sup>-2</sup>           | 34,56 MJ.m <sup>-2</sup>              |
| E62              | 0,90 MJ.m <sup>-2</sup>           | 51,84 MJ.m <sup>-2</sup>              |
| E80              | 1,20 MJ.m <sup>-2</sup>           | 69,12 MJ.m <sup>-2</sup>              |

O passo de chuva (usando água à temperatura ambiente), imediatamente após o passo de exposição UV, provoca um choque térmico nos materiais (a temperatura diminui rapidamente dos 60 °C para cerca de 24 °C). A Figura 9.6 ilustra a variação da temperatura durante os diversos passos que constituem o ensaio E44.

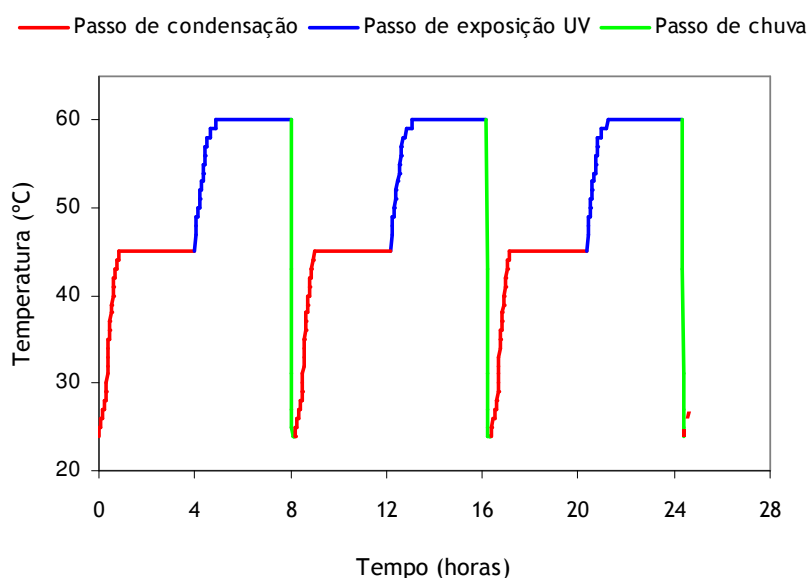


Figura 9.6 - Variação da temperatura durante o ensaio climático E44.

#### 9.3.1.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500

Os geotêxteis sem C944 não apresentavam sinais visíveis de degradação depois do ensaio climático E08. A introdução do passo de exposição à radiação UV provocou uma degradação muito elevada nos materiais. De facto, após o ensaio E26, os geotêxteis B0-280 e B0-500 evidenciavam vários sinais de degradação (libertação de imensas fibras degradadas e diminuição da espessura) e estavam muito perto da destruição total (os materiais podiam ser rasgados com grande facilidade). Após os ensaios E44, E62 e E80, os geotêxteis B0-280 e B0-500 estavam reduzidos a pequenos pedaços ou mesmo a pó. A cor dos materiais não sofreu nenhuma alteração durante os ensaios, nem foram perceptíveis odores devido à libertação de compostos voláteis durante o processo de degradação dos geotêxteis. A Figura 9.7 ilustra o aspecto do geotêxtil B0-280 após os ensaios E08, E26 e E44 (o aspecto após os ensaios E62 e E80 era idêntico ao apresentado no fim do ensaio E44). O aspecto do geotêxtil B0-500 depois dos ensaios climáticos era semelhante ao do geotêxtil B0-280.

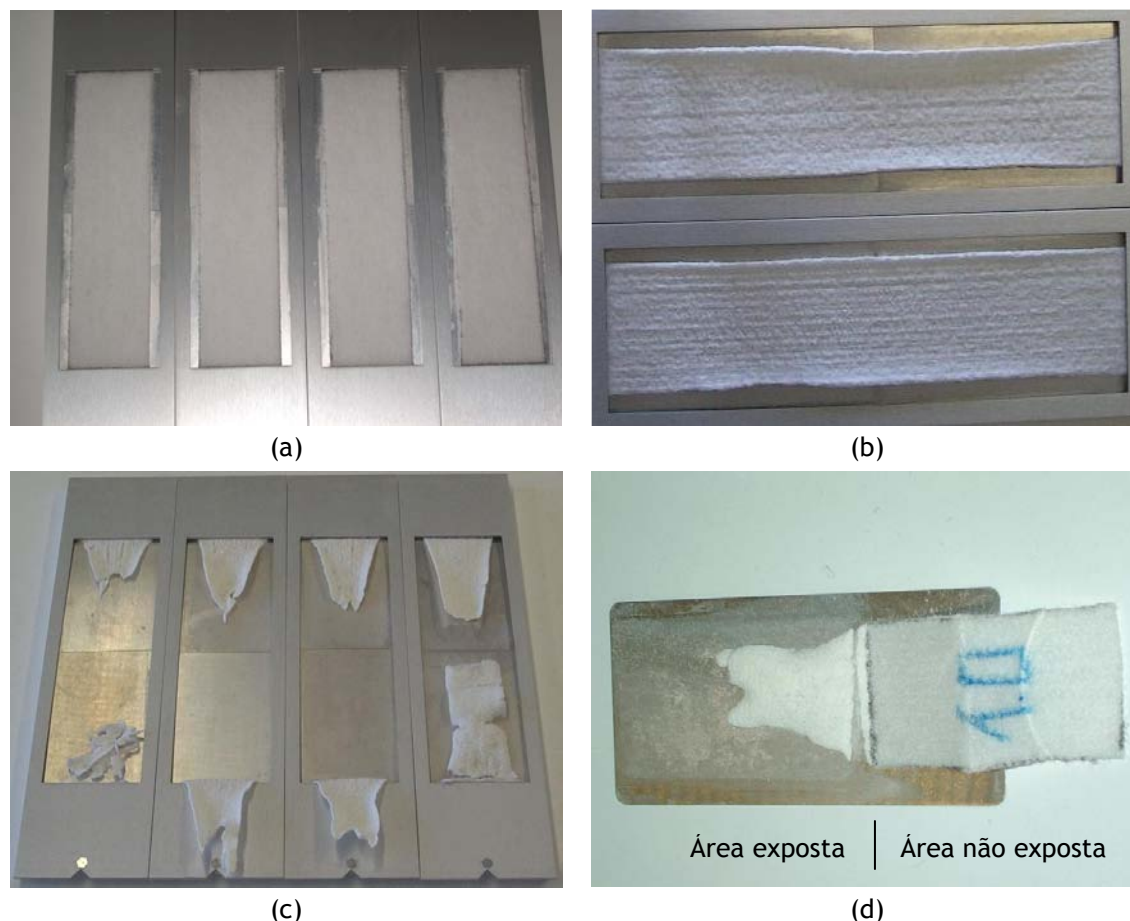


Figura 9.7 - Aspecto do geotêxtil B0-280 após os ensaios climáticos no QUV:  
(a) Ensaio E08; (b) Ensaio E26; (c) Ensaio E44; (d) Ensaio E44 (pormenor de um provete).

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após a exposição aos diversos ensaios climáticos no QUV, encontram-se resumidos no Quadro 9.4. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão no Quadro 9.5. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climáticos no QUV, encontram-se ilustradas na Figura 9.8.

Quadro 9.4 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 13,4 (14%)                                   | 76,1 (8,4%)                  | ---                      |
| E08              | 13,9 (13%)                                   | 75,4 (4,7%)                  | <b>104</b>               |
| E26              | 0,05 (9,2%)                                  | 6,2 (24%)                    | <b>0,4</b>               |
| E44              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |
| E62              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |
| E80              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.5 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climatérico | $J_{SEC}$ 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 5,8                                   | 6,6                                   | 6,7                                    | 7,6                                    | 438                               | ---                   |
| E08                | 7,0                                   | 8,5                                   | 10,1                                   | 10,8                                   | 519                               | <b>118</b>            |
| E26                | 0,9                                   | 0,7                                   | 0,1                                    | ---                                    | 0,2                               | <b>0</b>              |
| E44                | ---                                   | ---                                   | ---                                    | ---                                    | 0                                 | <b>0</b>              |
| E62                | ---                                   | ---                                   | ---                                    | ---                                    | 0                                 | <b>0</b>              |
| E80                | ---                                   | ---                                   | ---                                    | ---                                    | 0                                 | <b>0</b>              |

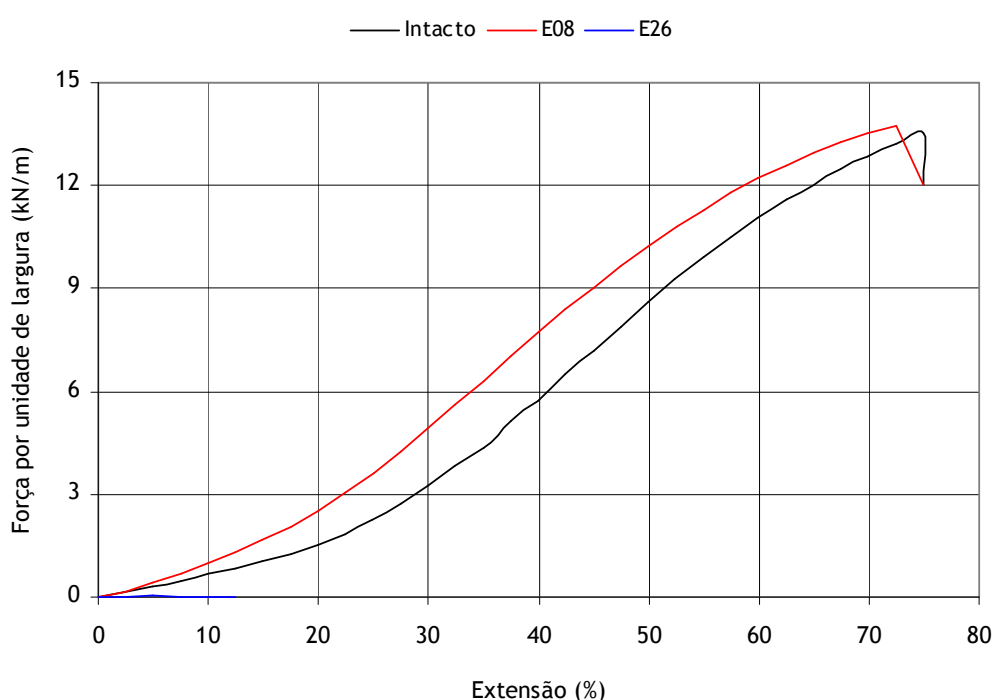


Figura 9.8 - Curvas médias força-estensão do geotêxtil B0-280, antes e após os ensaios climatéricos E08 e E26.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climatéricos no QUV, estão resumidas no Quadro 9.6 e no Quadro 9.7; as curvas médias força-estensão encontram-se ilustradas na Figura 9.9.

A resistência à tracção dos geotêxteis B0-280 e B0-500 manteve-se praticamente inalterada no final do ensaio E08 (resistências residuais de 104% e 99,2%, respectivamente). A introdução do passo de exposição à radiação UV provocou uma diminuição da resistência à tracção dos materiais. De facto, após o ensaio E26 (radiação incidente total de 0,30 MJ.m<sup>-2</sup> aos 340 nm), a resistência à tracção dos geotêxteis B0-280 e B0-500 era quase nula (resistências residuais de 0,4% e 4,5%, respectivamente). O aumento da duração do passo de exposição à radiação UV (e o consequente aumento da radiação incidente total) provocou a destruição integral dos geotêxteis B0-280 e B0-500 (resistência à tracção nula no fim dos ensaios E44, E62 e E80).

Quadro 9.6 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 26,2 (14%)                                   | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| E08              | 26,0 (5,5%)                                  | 77,6 (4,3%)                  | <b>99,2</b>              |
| E26              | 1,19 (61%)                                   | 9,4 (44%)                    | <b>4,5</b>               |
| E44              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |
| E62              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |
| E80              | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.7 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 27,0  | 30,2  | 31,3   | 35,3   | 1117                            | ---                   |
| E08              | 26,4  | 28,9  | 30,4   | 34,4   | 1146                            | <b>103</b>            |
| E26              | 19,2  | 15,8  | 7,8  | ---  | 8,1                             | <b>0,7</b>            |
| E44              | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |
| E62              | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |
| E80              | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |

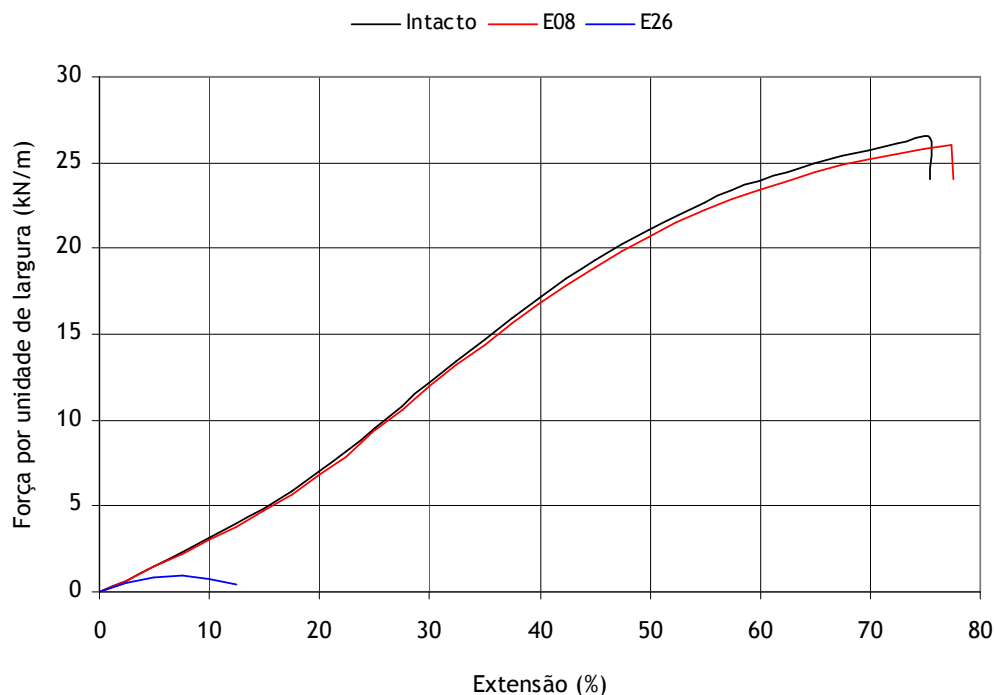


Figura 9.9 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os ensaios climáticos E08 e E26.

A extensão na força máxima dos geotêxteis B0-280 e B0-500 não sofreu grandes alterações após o ensaio climatérico E08 (extensões na força máxima idênticas às originais). A exposição dos materiais à radiação UV causou uma redução muito grande da extensão na força máxima. De facto, no fim do ensaio E26, o geotêxtil B0-280 possuía uma extensão na força máxima de 6,2% (extensão original de 76,1%) e o geotêxtil B0-500 apresentava uma extensão na força máxima de 9,4% (extensão original de 75,0%).

A robustez dos materiais não sofreu alterações significativas após o ensaio E08 (robustez residual de 118% para o geotêxtil B0-280 e robustez residual de 103% para o geotêxtil B0-500). A introdução do passo de exposição UV levou a uma grande diminuição da robustez dos materiais (no fim do ensaio E26, robustez residual de 0% para o geotêxtil B0-280 e de 0,7% para o geotêxtil B0-500).

A exposição a passos de chuva e de condensação (ensaio E08) não provocou danos significativos nos geotêxteis B0-280 e B0-500. Assim, a degradação causada pelos passos de chuva e de condensação é mínima. A exposição à radiação UV causou uma degradação muito elevada dos materiais (geotêxteis B0-280 e B0-500 quase destruídos após o ensaio E26).

A análise por MEV mostrou a inexistência de danos nos geotêxteis B0-280 e B0-500 no fim do ensaio E08 (as amostras expostas possuíam um aspecto idêntico ao aspecto das amostras de referência). A Figura 9.10 ilustra algumas imagens obtidas por MEV de fibras (degradadas) do geotêxtil B0-280 após o ensaio E44.

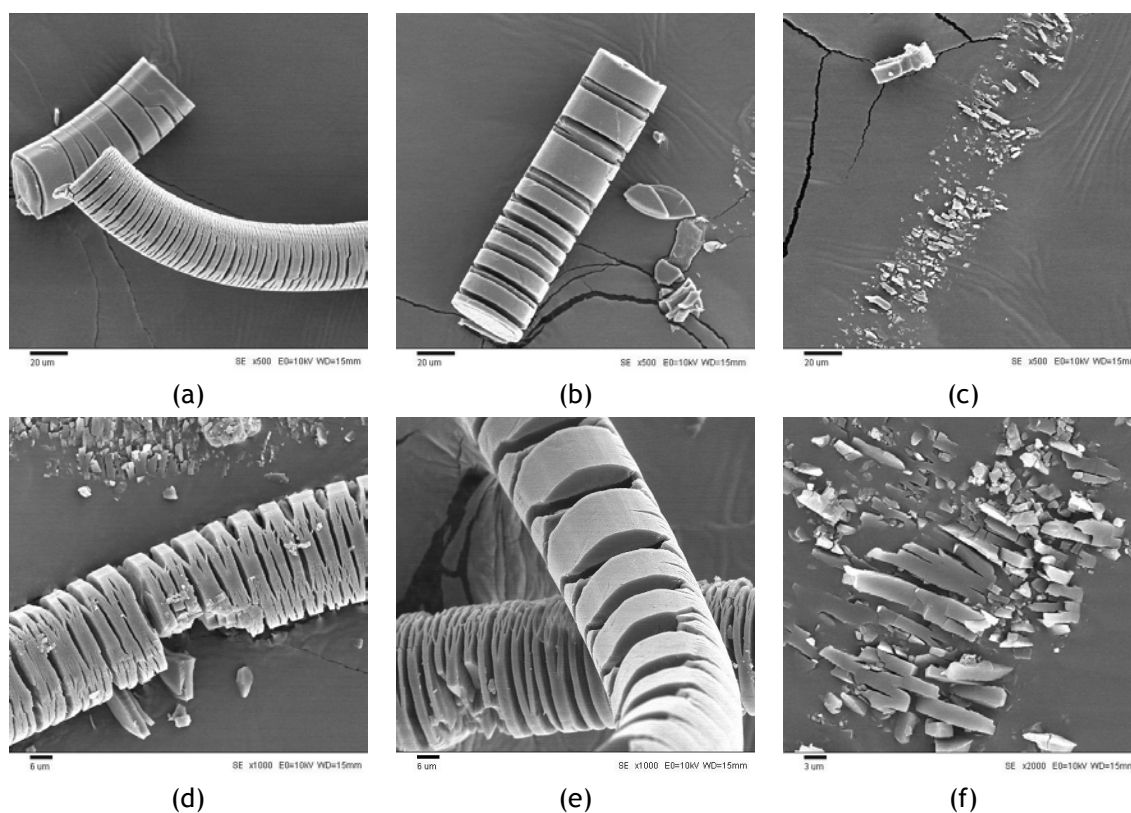


Figura 9.10 - Imagens obtidas por MEV das fibras do geotêxtil B0-280 após o ensaio climatérico E44: (a) x500; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

As fibras do geotêxtil B0-280 apresentavam danos visíveis (fibras quebradas e fissuras transversais) após o ensaio climático E44. As fissuras eram relativamente largas e profundas, causando a quebra das fibras e originando a libertação de pequenos pedaços de material polimérico (as Figuras 9.10c e 9.10f ilustram alguns pedaços de material polimérico que se desprenderam de uma fibra). Os danos observados no geotêxtil B0-500 foram idênticos aos danos existentes no geotêxtil B0-280 (materiais produzidos a partir das mesmas fibras).

### 9.3.1.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500

Os geotêxteis B2-280 e B2-500 não sofreram degradação completa em nenhum ensaio climático, o que, desde logo, indicou a importância do aditivo C944 na protecção das fibras de PP contra a acção dos agentes climáticos (na ausência de C944, os materiais estariam praticamente destruídos após o ensaio E26). No fim dos ensaios E08, E26 e E44, os geotêxteis B2-280 e B2-500 não apresentavam sinais visíveis de degradação. A ocorrência de alguma degradação foi observada após o ensaio E62: os geotêxteis B2-280 e B2-500 libertavam algumas fibras degradadas (a passagem suave das mãos pela superfície dos materiais originava a libertação imediata de fibras quebradas). Depois do ensaio E80, a existência de degradação nos geotêxteis B2-280 e B2-500 era muito mais evidente (libertação de imensas fibras degradadas, diminuição da espessura, materiais mais frágeis) do que no final do ensaio E62. A cor dos geotêxteis não sofreu alterações durante os ensaios climáticos, nem foram notados odores devido à libertação de compostos voláteis durante a degradação dos materiais.

O Quadro 9.8 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após a exposição aos vários ensaios climáticos. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 9.9. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climáticos, estão ilustradas na Figura 9.11.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos, encontram-se resumidas no Quadro 9.10 e no Quadro 9.11. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climáticos, estão representadas na Figura 9.12.

Quadro 9.8 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 13,5 (12%)                                  | 78,4 (6,6%)                  | ---                      |
| E08              | 13,7 (13%)                                  | 77,3 (11%)                   | <b>101</b>               |
| E26              | 8,65 (10%)                                  | 51,7 (8,7%)                  | <b>64,1</b>              |
| E44              | 5,85 (11%)                                  | 40,4 (6,3%)                  | <b>43,3</b>              |
| E62              | 3,52 (28%)                                  | 34,1 (6,7%)                  | <b>26,1</b>              |
| E80              | 1,35 (47%)                                  | 22,1 (15%)                   | <b>10,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.9 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | $J_{SEC}$ 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 5,9                                   | 6,7                                   | 7,0                                    | 8,1                                    | 478                               | ---                   |
| E08              | 6,2                                   | 7,2                                   | 7,1                                    | 8,3                                    | 476                               | <b>99,6</b>           |
| E26              | 5,5                                   | 7,5                                   | 10,1                                   | 13,3                                   | 238                               | <b>49,8</b>           |
| E44              | 5,8                                   | 8,9                                   | 12,3                                   | 14,5                                   | 113                               | <b>23,6</b>           |
| E62              | 6,0                                   | 8,3                                   | 10,1                                   | 10,9                                   | 62,6                              | <b>13,1</b>           |
| E80              | 4,6                                   | 5,6                                   | 6,4                                    | 5,8                                    | 19,1                              | <b>4,0</b>            |

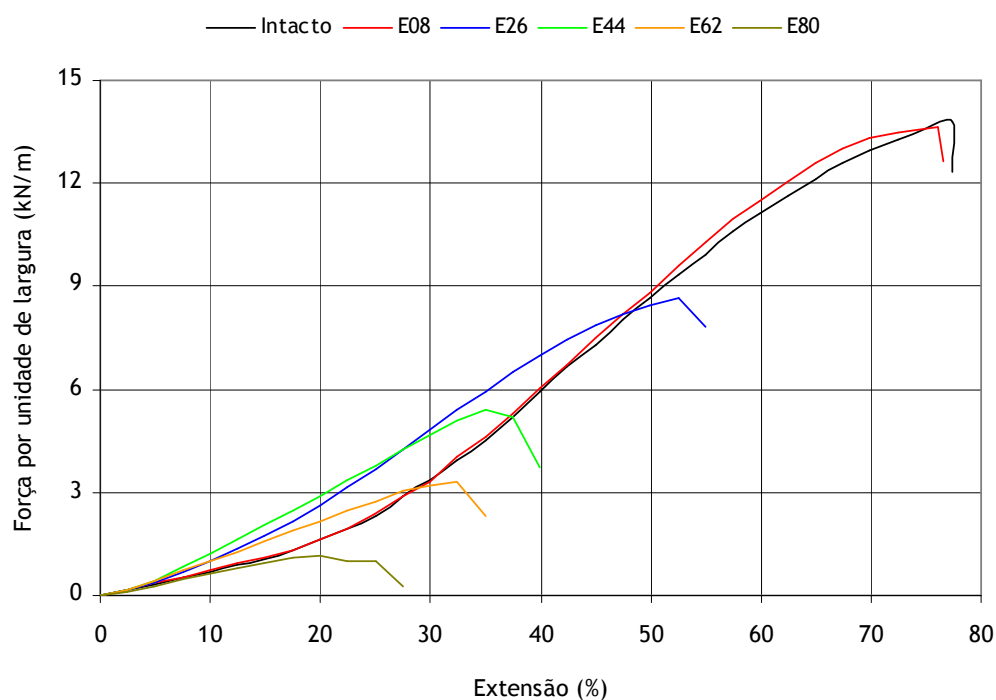


Figura 9.11 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

Quadro 9.10 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 26,6 (11%)                                  | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| E08              | 26,5 (6,0%)                                 | 74,1 (7,8%)                  | <b>99,6</b>              |
| E26              | 22,2 (7,9%)                                 | 55,5 (4,8%)                  | <b>83,5</b>              |
| E44              | 16,4 (11%)                                  | 37,8 (5,0%)                  | <b>61,6</b>              |
| E62              | 12,4 (21%)                                  | 30,9 (7,5%)                  | <b>46,6</b>              |
| E80              | 7,22 (26%)                                  | 25,5 (14%)                   | <b>27,1</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 32,5                                      | 35,1                                      | 35,9                                       | 40,0                                       | 1076                           | ---                   |
| E08              | 26,6                                      | 30,2                                      | 32,5                                       | 36,8                                       | 1079                           | 100                   |
| E26              | 33,8                                      | 37,5                                      | 40,0                                       | 43,9                                       | 621                            | 57,7                  |
| E44              | 33,2                                      | 39,6                                      | 42,6                                       | 45,0                                       | 282                            | 26,2                  |
| E62              | 32,9                                      | 38,8                                      | 41,5                                       | 42,5                                       | 190                            | 17,7                  |
| E80              | 24,7                                      | 28,6                                      | 30,3                                       | 29,9                                       | 89,9                           | 8,4                   |

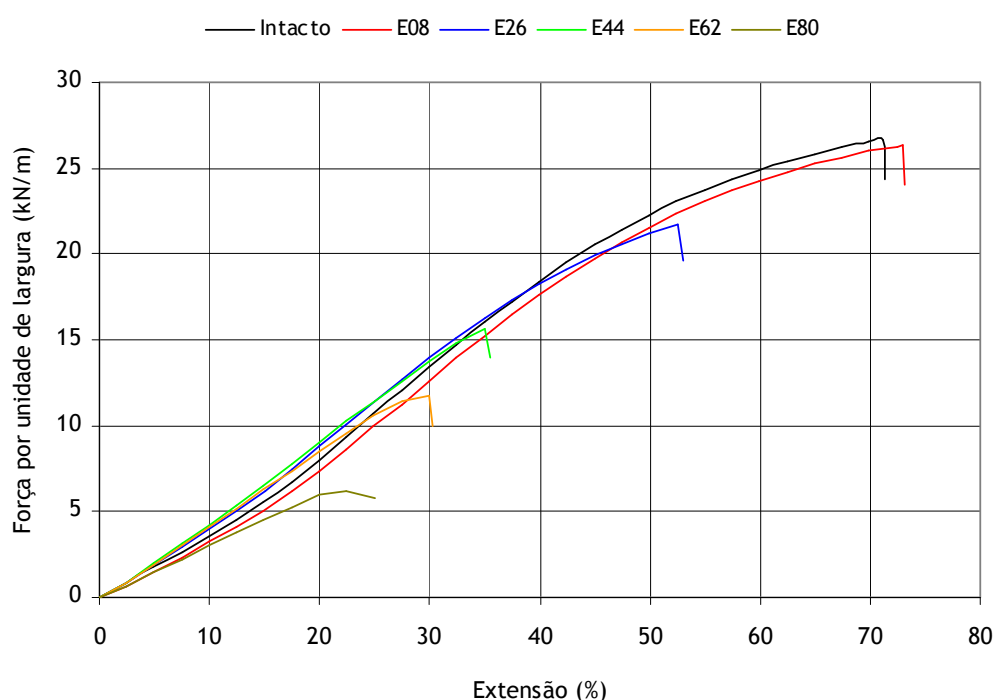


Figura 9.12 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

A resistência à tracção dos geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 não sofreu alterações muito significativas após o ensaio E08 (com passos de chuva e de condensação). A exposição dos materiais à radiação UV provocou uma diminuição muito significativa da sua resistência à tracção. De facto, no fim do ensaio E26, os geotêxteis B2-280 e B2-500 apresentavam resistências residuais de 64,1% e de 83,5%, respectivamente. O aumento da duração do passo de exposição à radiação UV (aumento da radiação incidente total) levou a uma redução adicional da resistência à tracção dos geotêxteis B2-280 e B2-500. Após o ensaio E80, o geotêxtil B2-280 possuía uma resistência residual de 10,0% e o geotêxtil B2-500 apresentava uma resistência residual de 27,1%. A diminuição gradual da resistência dos materiais com o aumento da radiação incidente total demonstra o efeito prejudicial da radiação UV na durabilidade dos geotêxteis.



A extensão na força máxima dos geotêxteis B2-280 e B2-500 diminuiu após os ensaios climatéricos com passos de exposição à radiação UV (a extensão na força máxima não sofreu grandes alterações no fim do ensaio E08). Após o ensaio E26, o geotêxtil B2-280 possuía uma extensão na força máxima de 51,7% (extensão original de 78,3%), enquanto que o geotêxtil B2-500 apresentava uma extensão na força máxima de 55,5% (extensão original de 71,6%). A extensão na força máxima dos materiais diminuiu do ensaio E26 para o ensaio E80 (aumento da duração do passo de exposição à radiação UV). No final do ensaio E80, os geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam extensões na força máxima de 22,1% e de 25,5%, respectivamente.

A robustez dos geotêxteis B2-280 e B2-500 manteve-se praticamente constante após o ensaio E08. A exposição nos ensaios E26, E44, E62 e E80 (com passos de exposição à radiação UV) provocou uma grande diminuição da robustez dos materiais (diminuição superior nos ensaios com maior tempo de exposição à radiação UV). Após o ensaio E26, os geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam uma robustez residual de 49,8% e de 57,7%, respectivamente (no final do ensaio E80, robustez residual de 4,0% para o geotêxtil B2-280 e robustez residual de 8,4% para o geotêxtil B2-500).

Os valores da rigidez secante dos geotêxteis B2-280 e B2-500 após os ensaios climatéricos E08, E26, E44 e E62 sofreram algumas variações: de um modo geral, eram ligeiramente superiores aos valores de referência. No final do ensaio E80, a rigidez secante dos geotêxteis B2-280 e B2-500 diminuiu.

Tal como para os geotêxteis sem C944, a exposição a passos de chuva e de condensação (ensaio E08) também não provocou danos nos geotêxteis B2-280 e B2-500 (mostrando que a degradação causada pelos passos de chuva e de condensação, a existir, é pouco significativa). A exposição à radiação UV causou sérios danos nos materiais: degradação tanto maior quanto maior a duração dessa exposição. Assim, a degradação sofrida pelos geotêxteis nos ensaios climatéricos ocorre essencialmente devido à exposição à radiação UV.

A degradação sofrida pelos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante os ensaios climatéricos mostra que mesmo os materiais estabilizados não estão totalmente protegidos contra os danos provocados pelos agentes climatéricos. No entanto, é importante notar que a degradação sofrida pelos geotêxteis de PP foi consideravelmente retardada pela incorporação de uma pequena quantidade (0,2%) de C944 nos materiais. De facto, após o ensaio E26, os geotêxteis de PP sem C944 estavam quase destruídos, enquanto que os geotêxteis com 0,2% de C944 ainda possuíam resistências residuais relativamente elevadas (64,1% para o geotêxtil B2-280 e 83,5% para o geotêxtil B2-500).

A diminuição da resistência à tracção e da robustez foi maior no geotêxtil B2-280 ( $280 \text{ g.m}^{-2}$ ) do que no geotêxtil B2-500 ( $500 \text{ g.m}^{-2}$ ) (a Figura 9.13 compara a resistência residual dos geotêxteis B2-280 e B2-500 após os vários ensaios climatéricos). De modo a entender este facto, é importante notar que o geotêxtil B2-500 apresenta maior espessura (e maior densidade) do que o geotêxtil B2-280 e que apenas um lado dos materiais é directamente exposto aos agentes climatéricos. Deste modo, num geotêxtil mais espesso (e mais denso) as fibras localizadas no lado oposto ao lado da exposição estão mais protegidas da acção dos agentes climatéricos (a degradação destas fibras ocorre apenas quando as fibras superiores forem degradadas e removidas da superfície do material).

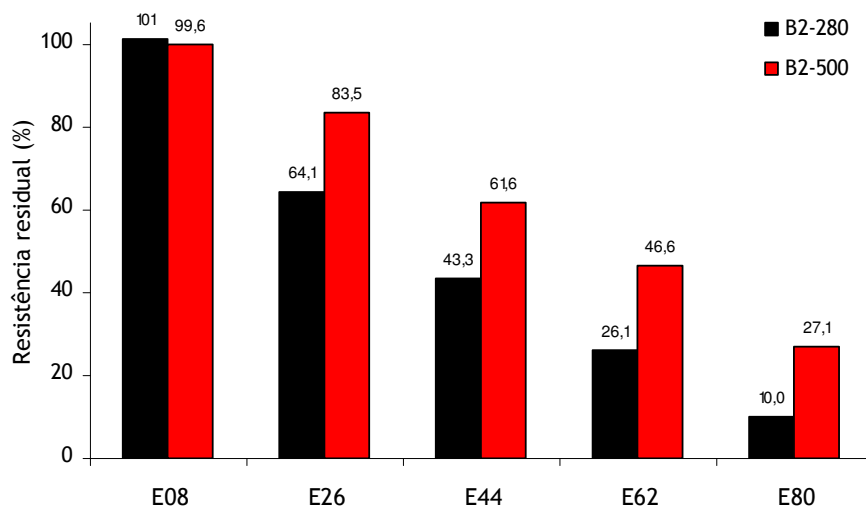


Figura 9.13 - Comparação da resistência residual dos geotêxteis B2-280 e B2-500 após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

A degradação sofrida pelos materiais durante os ensaios climáticos foi caracterizada por MEV. As Figuras 9.14, 9.15 e 9.16 ilustram algumas imagens obtidas para o geotêxtil B2-280 após a exposição nos ensaios E44, E62 e E80, respectivamente. A Figura 9.17 ilustra algumas imagens obtidas por MEV dos resíduos libertados (fibras degradadas) pelo geotêxtil B2-280 no final do ensaio climático E80. Os danos encontrados nas fibras do geotêxtil B2-500 foram idênticos aos danos observados nas fibras do geotêxtil B2-280 (ambos os materiais foram produzidos com o mesmo tipo de fibras).

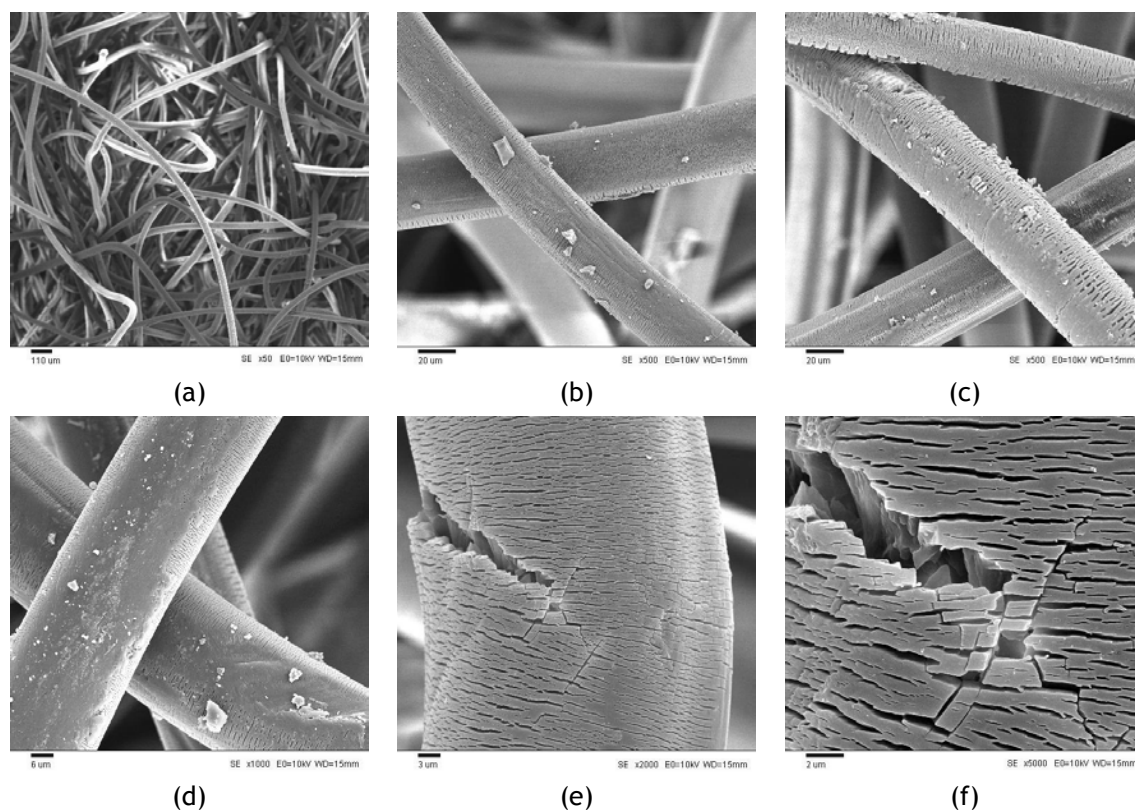


Figura 9.14 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climático E44: (a) x50; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x2000; (f) x5000.

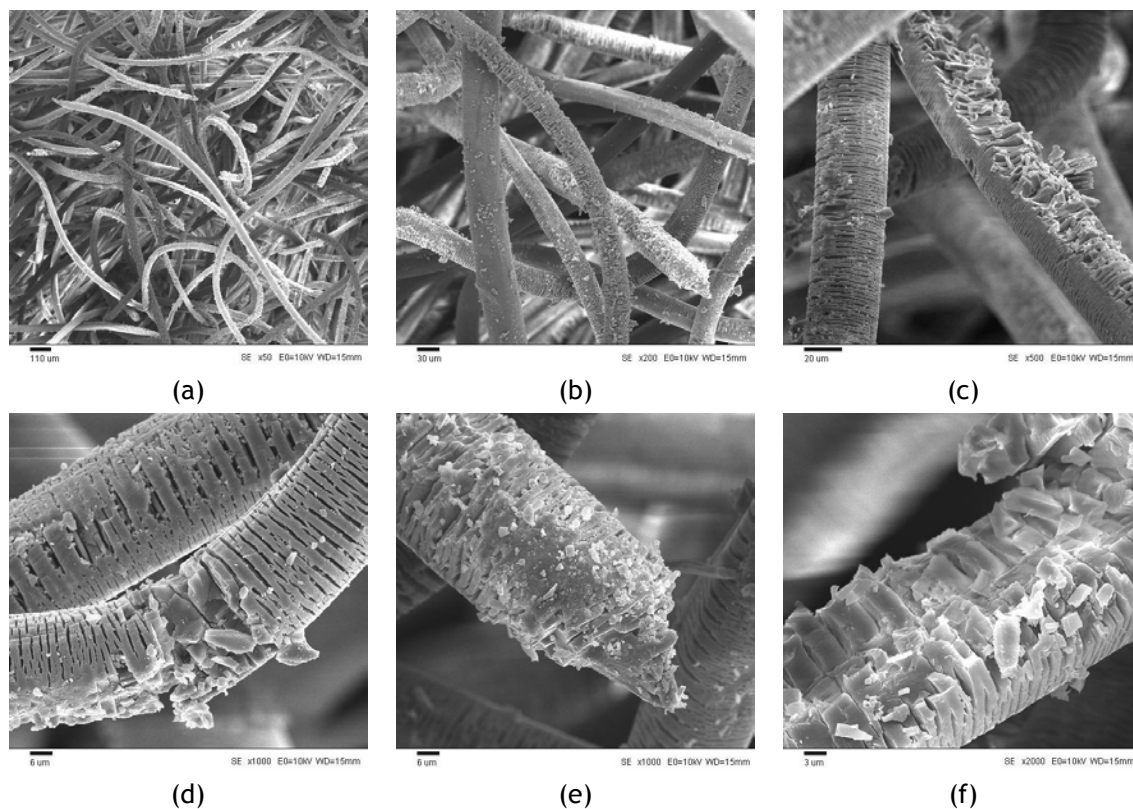


Figura 9.15 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E62:  
(a) x50; (b) x200; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

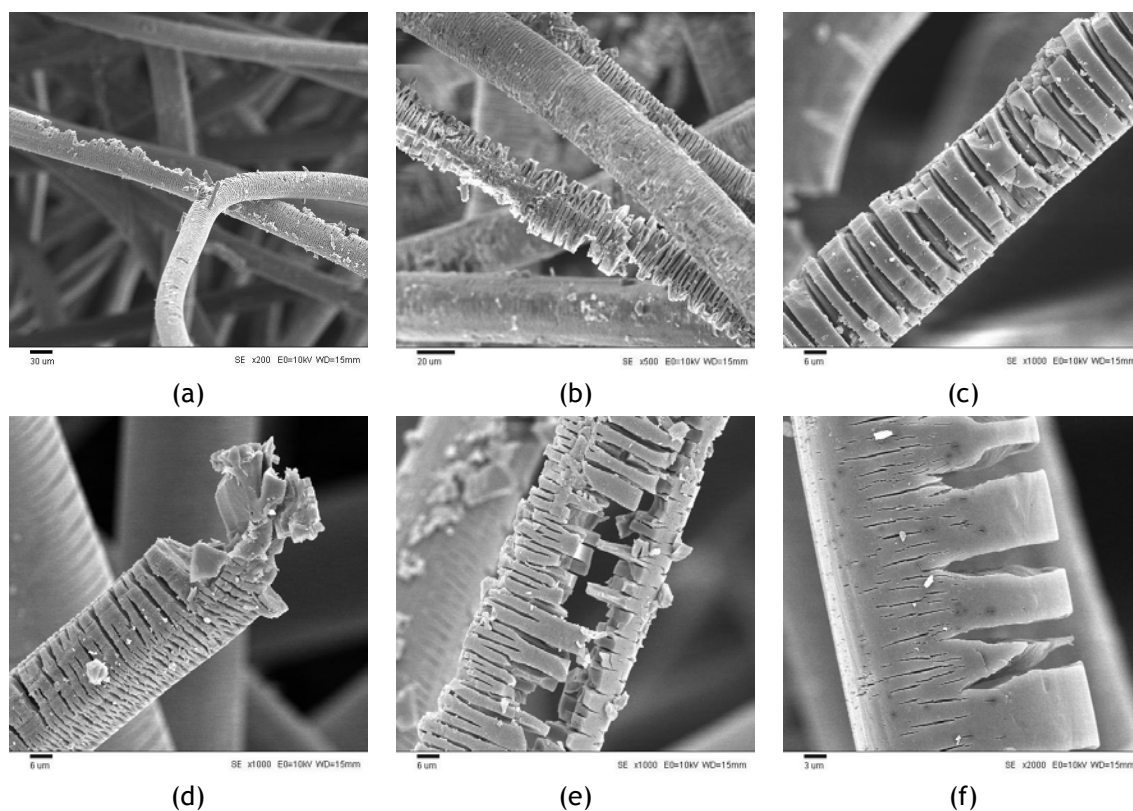


Figura 9.16 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-280 após o ensaio climatérico E80:  
(a) x200; (b) x500; (c) x1000; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

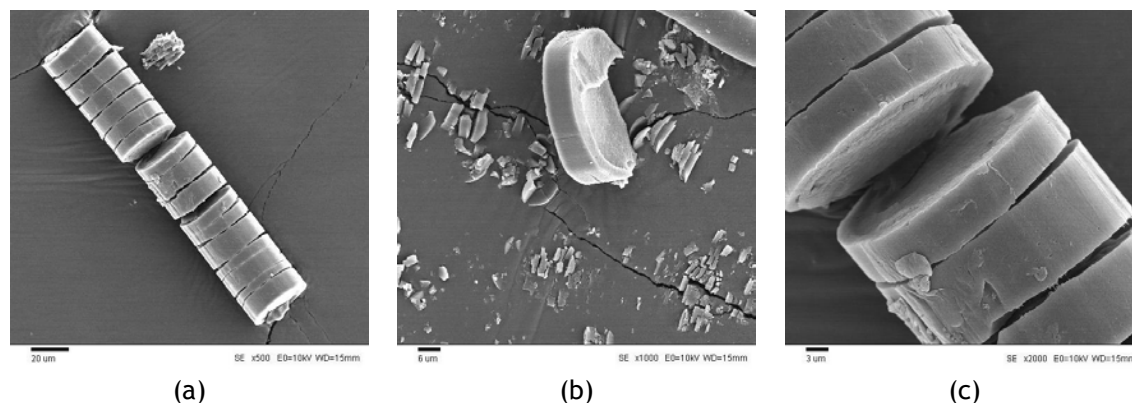


Figura 9.17 - Imagens obtidas por MEV dos resíduos libertados (fibras degradadas) pelo geotêxtil B2-280 após o ensaio climático E80: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

As fibras do geotêxtil B2-280 apresentavam sinais de degradação (pequenas fissuras transversais) no fim do ensaio climático E44. As fissuras eram abundantes (existiam em quase todas as fibras), mas relativamente estreitas e pouco profundas. O aumento do tempo de exposição à radiação UV causou uma maior degradação nas fibras do geotêxtil B2-280. De facto, após o ensaio climático E62, as fissuras existentes nas fibras do geotêxtil B2-280 alargaram e tornaram-se mais profundas e algumas fibras começaram a perder pedaços de material polimérico (pó observado a olho nu) (Figuras 9.15c, 9.15d e 9.15f); algumas fibras do geotêxtil B2-280 chegaram mesmo a quebrar (Figura 9.15e).

Após o ensaio climático E80, as fibras do geotêxtil B2-280 estavam muito degradadas e, em alguns casos, muito perto da destruição completa (Figuras 9.16e e 9.16f). As fissuras eram muito grandes e as fibras libertavam grandes quantidades de material polimérico (pequenos pedaços de fibras). As fibras estavam extremamente frágeis e quebravam com muita facilidade (Figura 9.16d). Os resíduos libertados pelo geotêxtil B2-280 (pó branco) continham pequenas porções de fibras (Figuras 9.17a e 9.17c), bem como restos de fibras transformadas em pequenos pedaços (Figura 9.17b).

#### 9.3.1.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500

Os geotêxteis B4-280 e B4-500 não possuíam sinais visíveis de degradação (tais como a libertação de fibras degradadas) após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80. A cor dos geotêxteis não sofreu nenhuma alteração e não foram notados odores devido à libertação de compostos voláteis durante a exposição dos materiais aos agentes climáticos.

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após a exposição aos vários ensaios climáticos, encontram-se resumidos no Quadro 9.12. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão no Quadro 9.13. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os vários ensaios climáticos, podem ser encontradas na Figura 9.18.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos no QUV, estão resumidas no Quadro 9.14 e no Quadro 9.15. A Figura 9.19 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e no final dos vários ensaios climáticos.

Quadro 9.12 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climatérico | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 13,3 (12%)                                   | 75,8 (8,0%)                  | ---                      |
| E08                | 15,4 (7,2%)                                  | 65,4 (8,3%)                  | <b>116</b>               |
| E26                | 12,5 (10%)                                   | 49,7 (4,5%)                  | <b>94,0</b>              |
| E44                | 10,7 (8,6%)                                  | 48,3 (6,0%)                  | <b>80,4</b>              |
| E62                | 6,68 (24%)                                   | 37,1 (11%)                   | <b>50,2</b>              |
| E80                | 5,06 (11%)                                   | 32,5 (4,5%)                  | <b>38,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climatérico | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 6,0   | 7,2   | 7,3  | 8,7  | 453                             | ---                   |
| E08                | 9,0   | 12,0  | 14,6   | 18,6   | 458                             | <b>101</b>            |
| E26                | 9,1   | 12,6  | 16,5   | 21,7   | 334                             | <b>73,7</b>           |
| E44                | 8,2   | 11,5  | 15,4   | 19,6   | 267                             | <b>58,9</b>           |
| E62                | 8,6   | 11,6  | 14,6   | 17,4   | 134                             | <b>29,6</b>           |
| E80                | 7,0   | 9,6   | 12,9   | 15,3   | 86,6                            | <b>19,1</b>           |

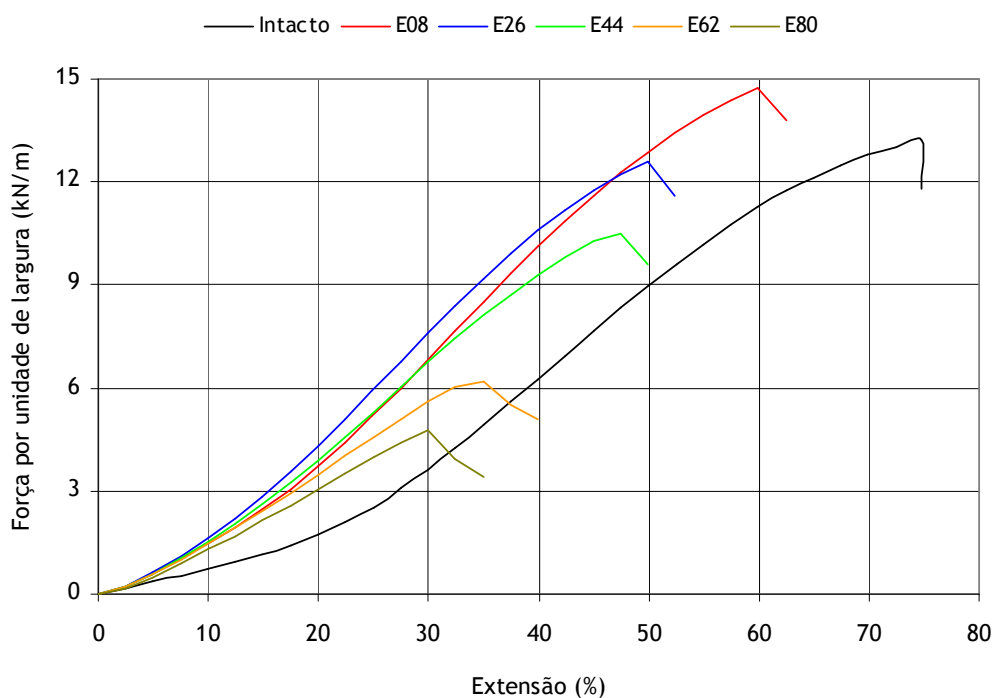


Figura 9.18 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

Quadro 9.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| E08              | 28,3 (8,9%)                                  | 76,2 (2,2%)                  | 103                      |
| E26              | 28,3 (9,9%)                                  | 54,1 (7,7%)                  | 103                      |
| E44              | 26,4 (13%)                                   | 54,3 (5,6%)                  | 95,7                     |
| E62              | 19,3 (17%)                                   | 41,6 (7,2%)                  | 69,9                     |
| E80              | 17,6 (16%)                                   | 35,9 (4,5%)                  | 63,8                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| E08              | 32,9  | 36,0  | 37,0   | 40,7   | 1233                            | 104                   |
| E26              | 45,0  | 51,2  | 54,7   | 58,7   | 813                             | 68,4                  |
| E44              | 40,5  | 46,6  | 50,0   | 53,8   | 751                             | 63,2                  |
| E62              | 36,6  | 43,0  | 46,3   | 49,0   | 369                             | 31,1                  |
| E80              | 41,8  | 47,9  | 50,9   | 52,9   | 300                             | 25,3                  |

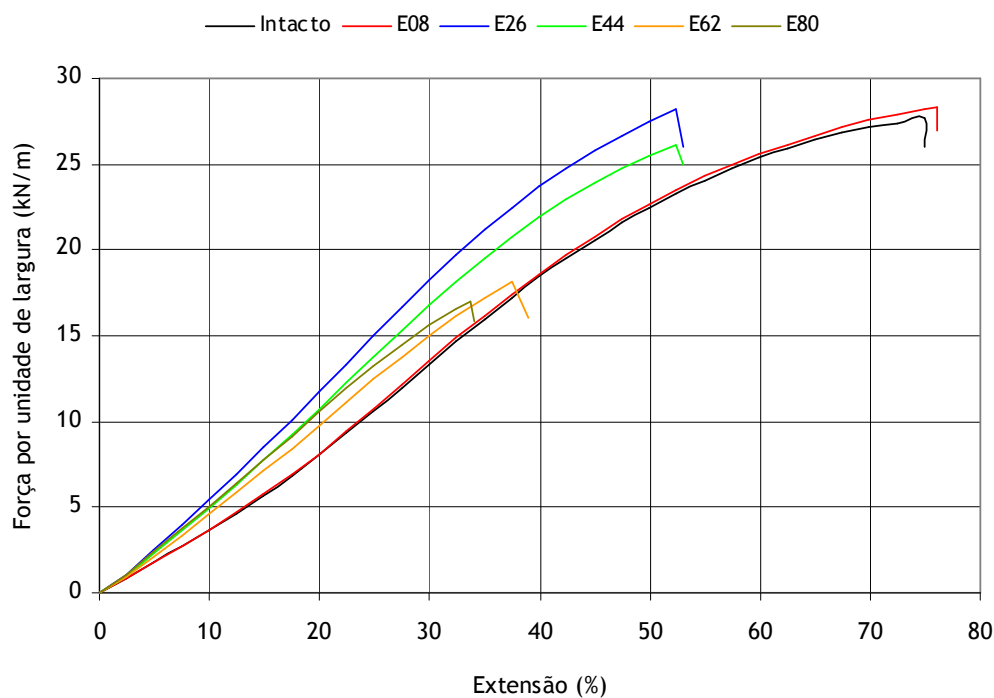


Figura 9.19 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

A resistência à tracção dos geotêxteis B4-280 e B4-500 não sofreu alterações muito significativas no fim do ensaio E08 (apenas com passos de chuva e de condensação). Após o ensaio E26, os geotêxteis B4-280 e B4-500 ainda possuíam resistências à tracção elevadas (resistências residuais de 94,0% e de 103%, respectivamente). No entanto, o aumento do tempo de exposição à radiação UV provocou uma diminuição da resistência à tracção dos materiais (diminuição gradual de E26 para E80). No fim do ensaio E80, o geotêxtil B4-280 apresentava uma resistência residual de 38,0%, enquanto que o geotêxtil B4-500 possuía uma resistência residual de 63,8%.

A extensão na força máxima dos geotêxteis B4-280 e B4-500 diminuiu após os ensaios climatéricos E26, E44, E62 e E80 (de um modo geral, diminuição tanto maior quanto maior o tempo de exposição à radiação UV). Os valores da rigidez secante dos geotêxteis B4-280 e B4-500 no final dos diferentes ensaios climatéricos foram iguais ou superiores aos valores de referência.

A robustez dos geotêxteis B4-280 e B4-500 não sofreu grandes alterações após o ensaio climatérico E08 (sem exposição à radiação UV). Os ensaios com passos de exposição à radiação UV (E26, E44, E62 e E80) provocaram uma diminuição da robustez dos materiais (diminuição gradual de E26 para E80). No fim do ensaio E26, os geotêxteis B4-280 e B4-500 possuíam uma robustez residual de 73,7% e de 68,4%, respectivamente (no final do ensaio E80, o geotêxtil B4-280 apresentava uma robustez residual de 19,1%, enquanto que o geotêxtil B4-500 possuía uma robustez residual de 25,3%).

Tal como para os geotêxteis com 0,2% de C944, a diminuição da resistência à tracção e da robustez dos geotêxteis com 0,4% de C944 também foi maior para o geotêxtil com menor massa por unidade de área (a Figura 9.20 compara a resistência residual dos geotêxteis B4-280 e B4-500 após os vários ensaios climatéricos). Assim, os geotêxteis com maior massa por unidade de área apresentam uma maior resistência à acção dos agentes climatéricos (quando comparados com geotêxteis com menor massa por unidade de área com uma composição química idêntica).

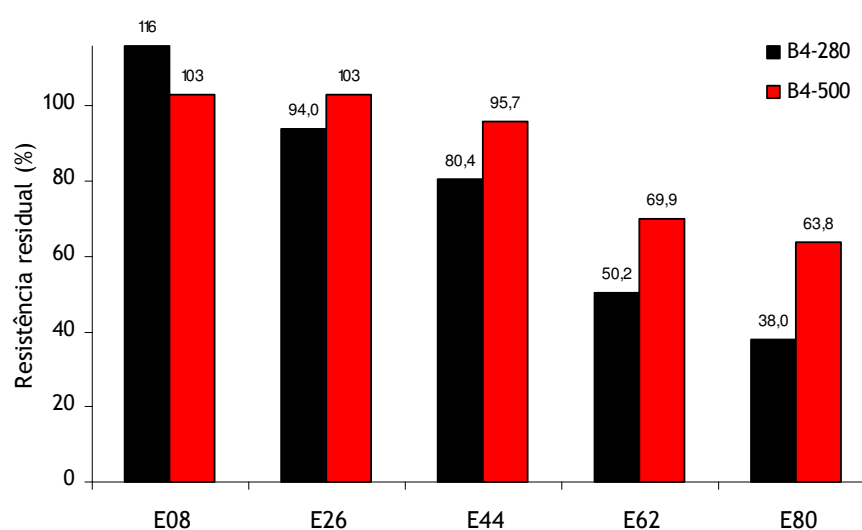


Figura 9.20 - Comparação da resistência residual dos geotêxteis B4-280 e B4-500 após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.



A degradação sofrida pelos geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos (apenas um lado dos materiais é directamente exposto) inicia-se pelas fibras superiores (directamente expostas), que vão sendo sucessivamente degradadas e removidas da superfície dos materiais (por exemplo, devido à erosão causada pelo passo de chuva). Após a remoção das fibras superiores degradadas, as fibras localizadas imediatamente abaixo (ainda relativamente pouco danificadas) ficam expostas à acção directa dos agentes climáticos (e sofrem também degradação). A degradação dos materiais ocorre gradualmente até que as fibras localizadas no lado oposto ao de exposição ficam sob a acção directa dos agentes climáticos e sofrem também degradação (ocorrendo, nessa altura, a destruição total do material). Assim, entre geotêxteis com composições idênticas, os de maior massa por unidade de área (normalmente mais espessos e/ou mais densos) possuem uma maior resistência aos agentes climáticos.

A degradação sofrida pelos geotêxteis com 0,4% de C944 durante os ensaios climáticos foi menor que a degradação sofrida pelos geotêxteis com 0,2% de C944. Após o ensaio E80, o geotêxtil B4-500 possuía uma resistência residual de 63,8% (resistência residual de 27,1% para o geotêxtil B2-500) e uma robustez residual de 25,3% (robustez residual de 8,4% para o geotêxtil B2-500). Deste modo, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos geotêxteis contra a acção dos agentes climáticos (a comparação dos resultados obtidos para os geotêxteis B2-280 e B4-280 permitiria obter a mesma conclusão).

A degradação sofrida pelos geotêxteis B4-280 e B4-500 foi caracterizada por MEV. As Figuras 9.21, 9.22 e 9.23 ilustram algumas imagens obtidas por MEV para o geotêxtil B4-280 após os ensaios E44, E62 e E80. Os danos existentes no geotêxtil B4-500 eram idênticos aos danos existentes no geotêxtil B4-280 (as fibras que constituem os materiais possuem a mesma composição).

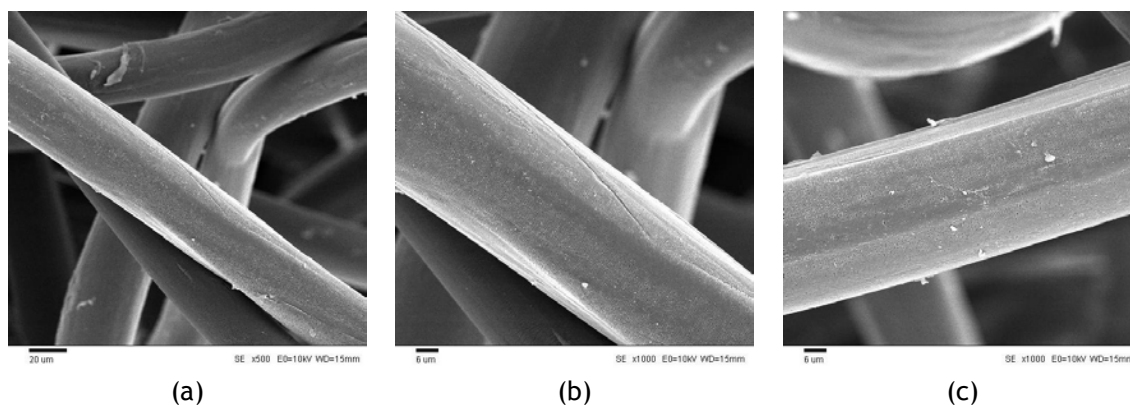


Figura 9.21 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climático E44: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

À semelhança das fibras com 0,2% de C944, as fibras com 0,4% de C944 também apresentavam sinais visíveis de degradação (fissuras muito pequenas) no fim do ensaio E44. Contudo, os danos existentes nas fibras com 0,4% de C944 eram menores que os danos observados nas fibras com 0,2% de C944; as fissuras existentes nas fibras com 0,4% de C944 eram menos abundantes e mais superficiais (menos profundas).



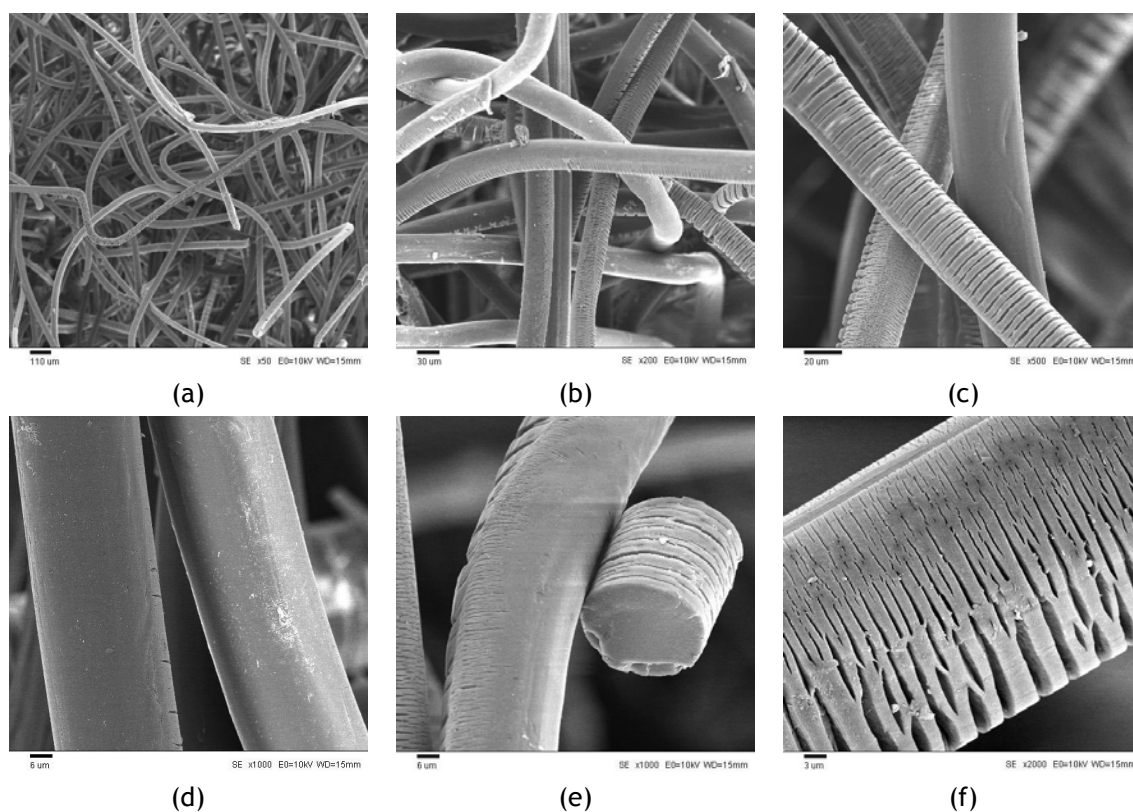


Figura 9.22 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climático E62:  
(a) x50; (b) x200; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

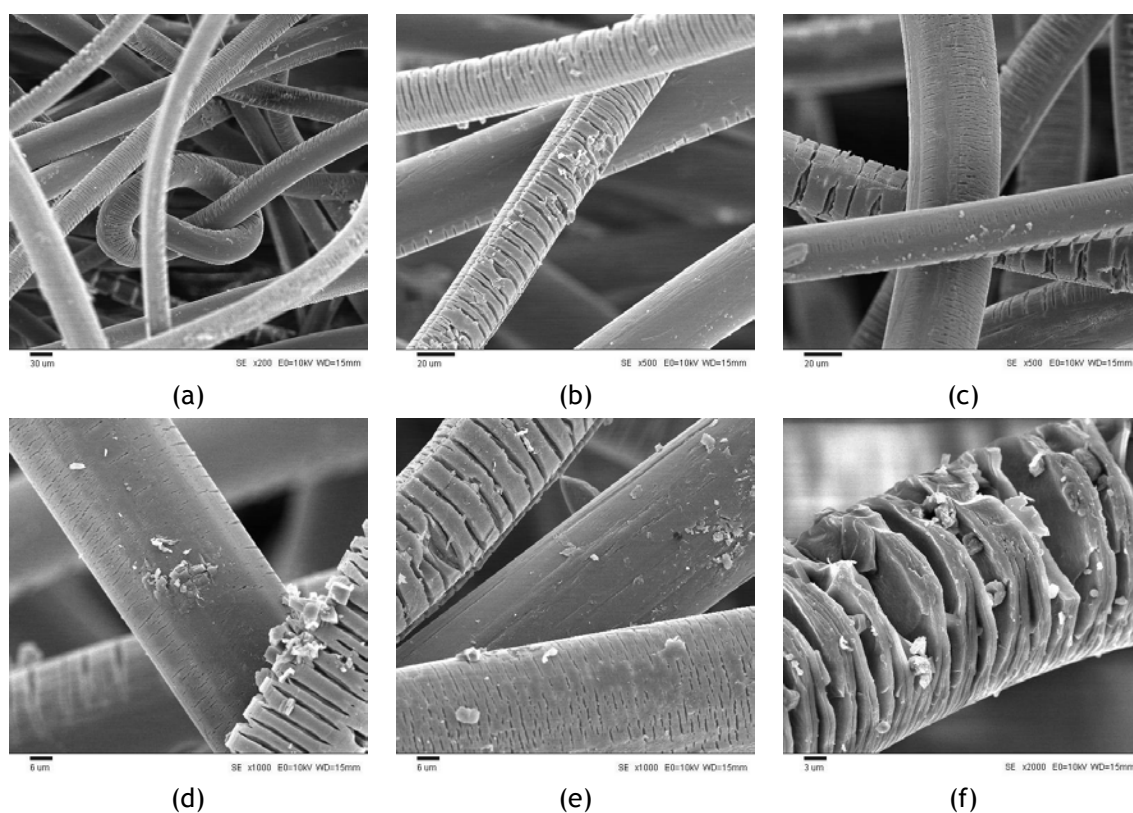


Figura 9.23 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-280 após o ensaio climático E80:  
(a) x200; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x1000; (f) x2000.

O aumento do tempo de exposição à radiação UV provocou uma maior degradação nas fibras com 0,4% de C944 (as fissuras tornaram-se mais abundantes, mais largas e mais profundas). No entanto, a degradação encontrada nas fibras com 0,4% de C944 foi sempre menor que degradação presente nas fibras com 0,2% de C944 (comparando fibras expostas aos mesmos ensaios climáticos), o que está de acordo com os resultados mecânicos obtidos.

#### 9.3.1.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500

Os geotêxteis P2-280 e P2-500 não apresentavam sinais de degradação após os ensaios climáticos, o que, desde logo, mostrou o efeito do negro de carbono na protecção dos materiais contra a acção dos agentes climáticos; é importante lembrar que os geotêxteis B2-280 e B2-500 (idênticos aos geotêxteis P2-280 e P2-500, mas sem negro de carbono) possuíam sinais de degradação (libertação de fibras degradadas) no fim dos ensaios climáticos E62 e E80.

As propriedades mecânicas do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climáticos, encontram-se resumidas nos Quadros 9.16 e 9.17. A Figura 9.24 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e depois dos vários ensaios climáticos.

Do mesmo modo, as propriedades mecânicas do geotêxtil P2-500 estão resumidas nos Quadros 9.18 e 9.19. As respectivas curvas médias força-extensão encontram-se representadas na Figura 9.25.

Quadro 9.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 15,3 (10%)                                  | 54,6 (8,3%)                  | ---                      |
| E08              | 15,0 (6,0%)                                 | 54,3 (2,0%)                  | <b>98,0</b>              |
| E26              | 16,2 (4,4%)                                 | 53,2 (5,3%)                  | <b>106</b>               |
| E44              | 15,2 (6,5%)                                 | 49,3 (7,5%)                  | <b>99,3</b>              |
| E62              | 15,4 (8,0%)                                 | 50,0 (8,2%)                  | <b>101</b>               |
| E80              | 16,1 (13%)                                  | 51,3 (8,8%)                  | <b>105</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 11,8                                      | 14,0                                      | 14,1                                       | 18,5                                       | 381                            | ---                   |
| E08              | 10,9                                      | 13,0                                      | 13,5                                       | 17,4                                       | 365                            | <b>95,8</b>           |
| E26              | 16,4                                      | 17,4                                      | 16,5                                       | 22,2                                       | 389                            | <b>102</b>            |
| E44              | 10,4                                      | 14,5                                      | 15,8                                       | 20,5                                       | 322                            | <b>84,5</b>           |
| E62              | 9,8                                       | 13,7                                      | 15,2                                       | 20,1                                       | 331                            | <b>86,9</b>           |
| E80              | 13,4                                      | 16,2                                      | 18,5                                       | 23,4                                       | 370                            | <b>97,1</b>           |

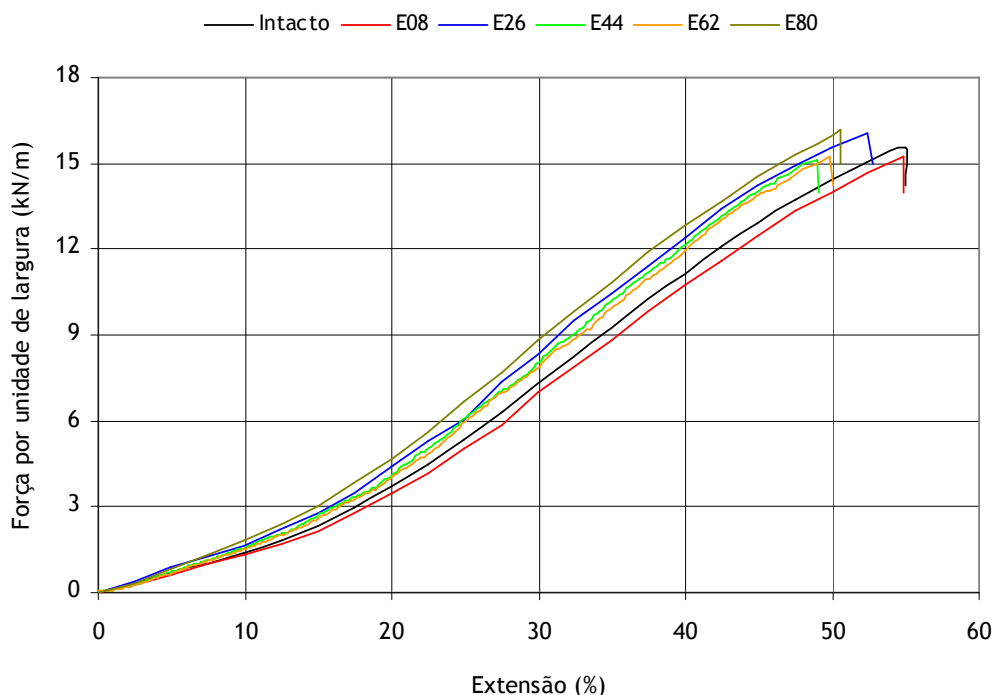


Figura 9.24 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

Quadro 9.18 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climatérico | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 25,6 (12%)                                   | 63,0 (9,0%)                  | ---                      |
| E08                | 25,5 (7,0%)                                  | 61,8 (9,4%)                  | <b>99,2</b>              |
| E26                | 25,8 (8,3%)                                  | 62,1 (8,4%)                  | <b>101</b>               |
| E44                | 25,9 (8,6%)                                  | 59,8 (3,6%)                  | <b>101</b>               |
| E62                | 25,3 (12%)                                   | 60,2 (3,0%)                  | <b>98,8</b>              |
| E80                | 26,7 (8,1%)                                  | 57,1 (6,2%)                  | <b>104</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.19 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climatéricos E08, E26, E44, E62 e E80.

| Ensaio climatérico | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 31,0  | 33,8  | 35,1   | 39,7   | 848                             | ---                   |
| E08                | 31,5  | 34,0  | 35,2   | 39,7   | 798                             | <b>94,1</b>           |
| E26                | 31,4  | 34,6  | 35,5   | 39,6   | 830                             | <b>97,9</b>           |
| E44                | 27,7  | 33,1  | 36,6   | 41,8   | 788                             | <b>92,9</b>           |
| E62                | 26,2  | 31,4  | 34,9   | 40,0   | 783                             | <b>92,3</b>           |
| E80                | 29,3  | 34,8  | 38,7   | 44,4   | 764                             | <b>90,1</b>           |

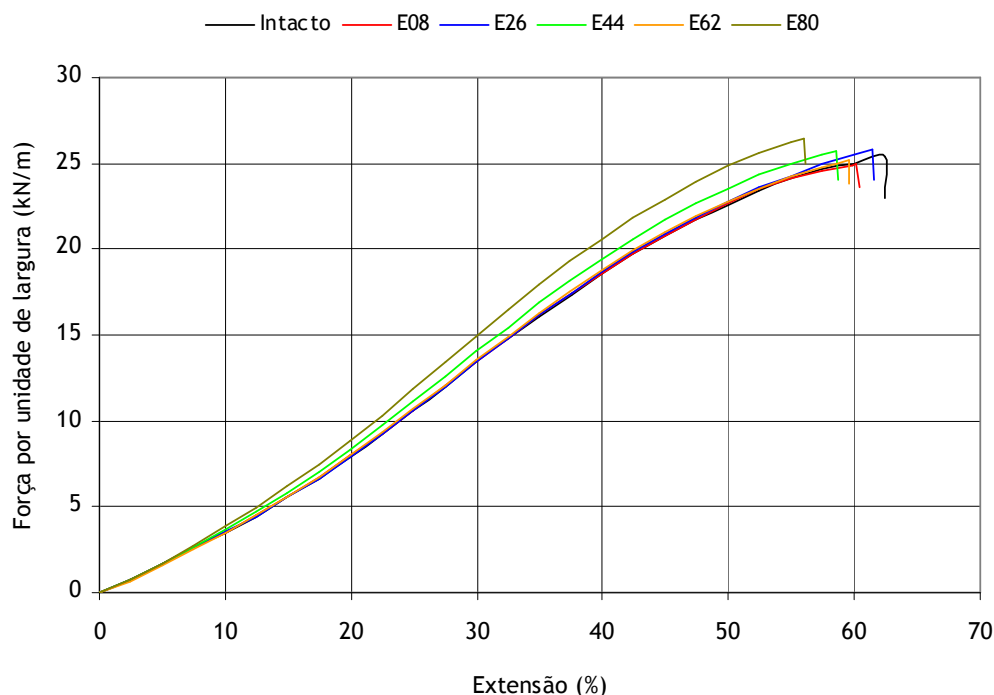


Figura 9.25 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

As resistências à tracção dos geotêxteis pretos não sofreram alterações muito significativas após os vários ensaios climáticos. De facto, mesmo no fim do ensaio E80 (maior exposição à radiação UV), os geotêxteis P2-280 e P2-500 possuíam resistências à tracção muito elevadas (resistências residuais de 105% e de 104%, respectivamente). A extensão na força máxima dos geotêxteis P2-280 e P2-500 não sofreu grandes alterações após os vários ensaios climáticos.

A robustez dos geotêxteis pretos não sofreu uma grande diminuição depois dos ensaios climáticos (para o geotêxtil P2-280, robustez residual mínima de 84,5% no fim do ensaio E44; para o geotêxtil P2-500, robustez residual mínima de 90,1% depois do ensaio E80). Os valores obtidos para a rigidez secante do geotêxtil P2-280 após os ensaios climáticos foram, de um modo geral, ligeiramente maiores que os valores de referência (maior excepção no ensaio E08); a rigidez secante do geotêxtil P2-500 não sofreu grandes alterações relativamente aos valores de referência.

A resistência dos geotêxteis P2-280 e P2-500 aos ensaios climáticos foi maior que a resistência dos geotêxteis B2-280 e B2-500 (materiais sem negro de carbono). Após o ensaio E80, o geotêxtil P2-500 possuía uma resistência residual de 104% (27,1% para o geotêxtil B2-500) e uma robustez residual de 90,1% (8,4% para o geotêxtil B2-500). Assim, a incorporação de uma pequena quantidade (1,08%) de negro de carbono nas fibras de PP resultou num grande aumento da resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos simulados artificialmente (a comparação dos resultados obtidos para os geotêxteis B2-280 e P2-280 originaria a mesma conclusão).

Os geotêxteis P2-280 e P2-500 apresentaram uma resistência muito elevada aos agentes climáticos simulados laboratorialmente. Deste modo, não foi possível observar o efeito da massa por unidade de área (e da espessura) na resistência dos materiais aos agentes em causa.

A análise dos geotêxteis P2-280 e P2-500 por MEV mostrou a inexistência de danos significativos nos materiais após os ensaios climáticos E08, E26, E44 e E62. No final do ensaio E80, para além das fibras não danificadas, foram também observadas algumas fibras com sinais de degradação (fissuras muito pequenas). A Figura 9.26 ilustra algumas imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-280 depois do ensaio climático E80. Os danos encontrados no geotêxtil P2-500 foram semelhantes aos danos observados no geotêxtil P2-280 (materiais fabricados a partir das mesmas fibras).

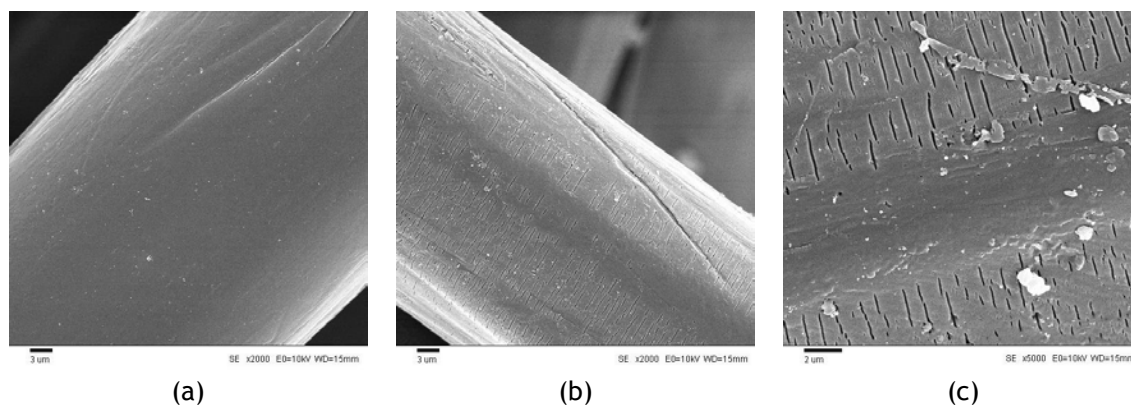


Figura 9.26 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-280 após o ensaio climático E80: (a) x2000; (b) x2000; (c) x5000.

As pequenas fissuras existentes nas fibras dos geotêxteis P2-280 e P2-500 após o ensaio climático E80 não foram suficientes para provocar alterações muito significativas nas propriedades mecânicas dos materiais. Assim, os geotêxteis P2-280 e P2-500 apresentaram uma excelente resistência face à degradação provocada pela exposição aos agentes climáticos artificiais. No entanto, o aumento do tempo de exposição à radiação UV seria suficiente para causar danos mais avultados nos materiais.

#### 9.3.1.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis aos vários ensaios climáticos

A resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos artificiais variou significativamente de acordo com a composição química dos materiais. A Figura 9.27 compara as resistências residuais dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , após os vários ensaios climáticos. Do mesmo modo, a Figura 9.28 compara as resistências residuais dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de  $500 \text{ g.m}^{-2}$ .

Os geotêxteis não estabilizados (B0-280 e B0-500) apresentaram uma baixa resistência aos agentes climáticos simulados em laboratório (excepção após o ensaio E08). De facto, os geotêxteis B0-280 e B0-500 foram praticamente destruídos em todos os ensaios climáticos com passos de exposição à radiação UV (E26, E44, E62 e E80).

A resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos aumentou muito pela incorporação de C944 nos materiais. A degradação sofrida pelos geotêxteis estabilizados com 0,4% de C944 foi menor que a degradação sofrida pelos geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa maior protecção dos materiais contra a degradação promovida pelos agentes climáticos.

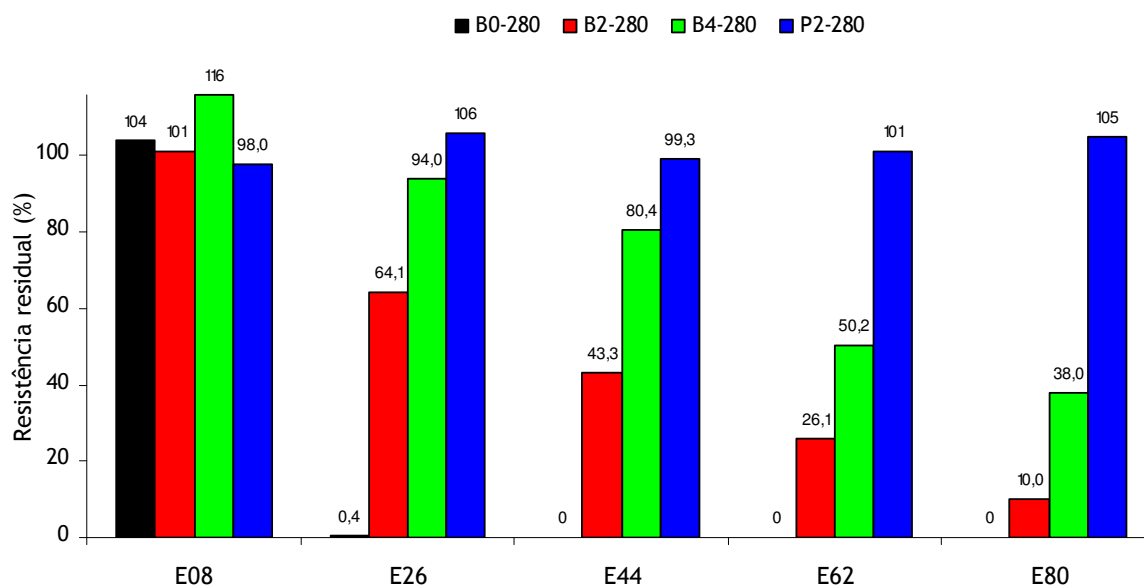


Figura 9.27 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

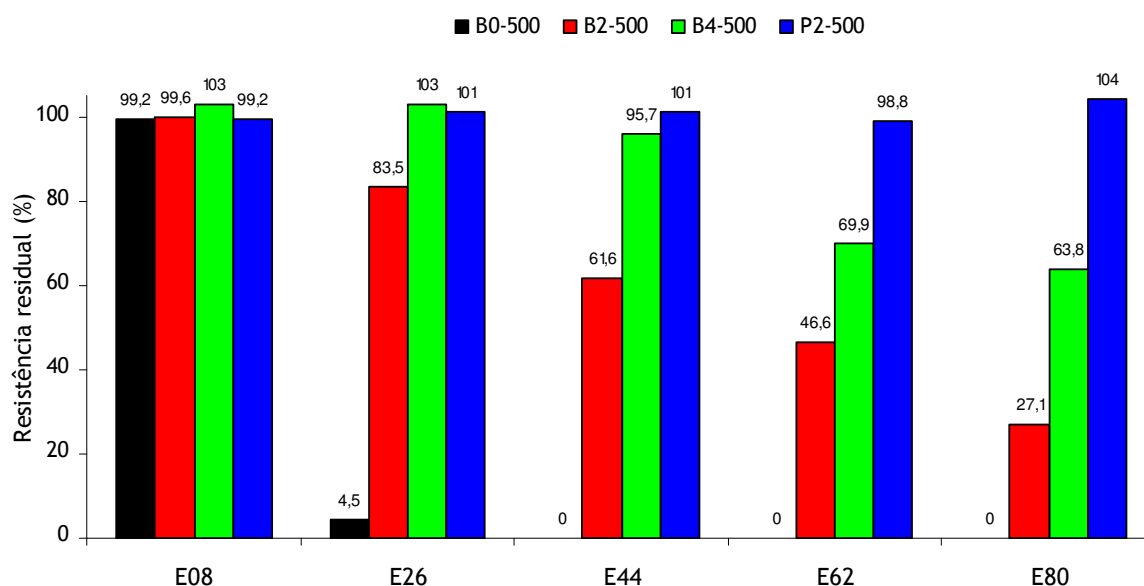


Figura 9.28 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após os ensaios climáticos E08, E26, E44, E62 e E80.

A incorporação de negro de carbono nas fibras de PP resultou num aumento muito significativo da resistência dos materiais aos agentes climáticos simulados em laboratório. De facto, os geotêxteis P2-280 e P2-500 possuíam resistências residuais muito elevadas após todos os ensaios climáticos.

A exposição a passos de chuva e de condensação (ensaio E08) não provocou danos significativos em nenhum dos geotêxteis. Assim, a degradação provocada pelos passos de chuva e de condensação, a existir, é muito pequena. A degradação dos geotêxteis ocorreu essencialmente devido à radiação UV e foi tanto maior quanto maior a radiação incidente total (tanto maior quanto maior o tempo total de exposição à radiação UV).

### 9.3.2 - Efeito do tempo de exposição na resistência dos geotêxteis

#### 9.3.2.1 - Características particulares dos ensaios

Os geotêxteis foram expostos ao mesmo ciclo climático (designado por ciclo C44 no ponto 9.3.1) (Quadro 9.20) durante diferentes intervalos de tempo (125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 horas). A exposição de 125 horas foi apenas realizada para os geotêxteis B0-280 e B0-500. A exposição de 500 horas corresponde ao ensaio E44 apresentado no ponto 9.3.1.

| Quadro 9.20 - Ciclo climático C44.                 |
|--|
| Passo 1: Exposição à radiação UV (60 °C) (4 horas) |
| Passo 2: Chuva (choque térmico) (10 minutos)       |
| Passo 3: Condensação (45 °C) (4 horas)             |
| (retorno ao passo 1)                               |

A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm. A radiação incidente total aumentou com o aumento da duração total do ensaio (maior número de ciclos C44). O Quadro 9.21 resume os valores da radiação incidente total para as diferentes durações de ensaio, bem como o número de ciclos C44 a que os geotêxteis foram expostos. A variação da temperatura durante o ensaio climático encontra-se ilustrada na Figura 9.6 (ponto 9.3.1).

| Quadro 9.21 - Número de ciclos C44 e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. |                      |                                   |                                       |
|--|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tempo  | Número de ciclos C44 | Radiação incidente total (340 nm) | Radiação incidente total (290-400 nm) |
| 125 Horas  | 15,3                 | $0,15 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $8,64 \text{ MJ.m}^{-2}$              |
| 250 Horas  | 30,6                 | $0,30 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $17,28 \text{ MJ.m}^{-2}$             |
| 500 Horas  | 61,2                 | $0,60 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $34,56 \text{ MJ.m}^{-2}$             |
| 1000 Horas   | 122,4                | $1,20 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $69,12 \text{ MJ.m}^{-2}$             |
| 2000 Horas   | 244,9                | $2,40 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $138,24 \text{ MJ.m}^{-2}$            |
| 4000 Horas   | 489,8                | $4,80 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $276,48 \text{ MJ.m}^{-2}$            |

#### 9.3.2.2 - Geotêxteis sem Chimassorb 944: B0-280 e B0-500

Os geotêxteis B0-280 e B0-500 possuíam sinais visíveis de degradação (libertação de alguns pedaços de fibras degradadas) após 125 horas de exposição aos agentes climáticos no QUV. O aumento do tempo de exposição provocou um aumento da degradação nos materiais. De facto, após 250 horas de exposição, os geotêxteis B0-280 e B0-500 libertavam imensas fibras degradadas, possuíam menor espessura e estavam visivelmente mais frágeis (materiais muito perto da destruição total; podiam ser manualmente transformados em pequenos pedaços). Após 500 horas de exposição, os materiais estavam completamente destruídos (transformados em pequenos pedaços ou mesmo em pó). A cor dos materiais não sofreu nenhuma alteração durante a exposição aos agentes climáticos.

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos, podem ser encontrados no Quadro 9.22. Os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual estão resumidos no Quadro 9.23. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climáticos, encontram-se ilustradas na Figura 9.29.

Quadro 9.22 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo     | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto   | 13,4 (14%)                                  | 76,1 (8,4%)                  | ---                      |
| 125 Horas | 2,69 (39%)                                  | 30,4 (19%)                   | <b>20,1</b>              |
| 250 Horas | 0,06 (31%)                                  | 6,2 (32%)                    | <b>0,4</b>               |
| 500 Horas | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.23 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo     | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-----------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto   | 5,8                                       | 6,6                                       | 6,7  | 7,6  | 438                            | ---                   |
| 125 Horas | 8,9                                       | 9,8                                       | 9,9  | 9,2  | 39,6                           | <b>9,0</b>            |
| 250 Horas | 1,0                                       | 0,8                                       | ---  | ---  | 0,2                            | <b>0</b>              |
| 500 Horas | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

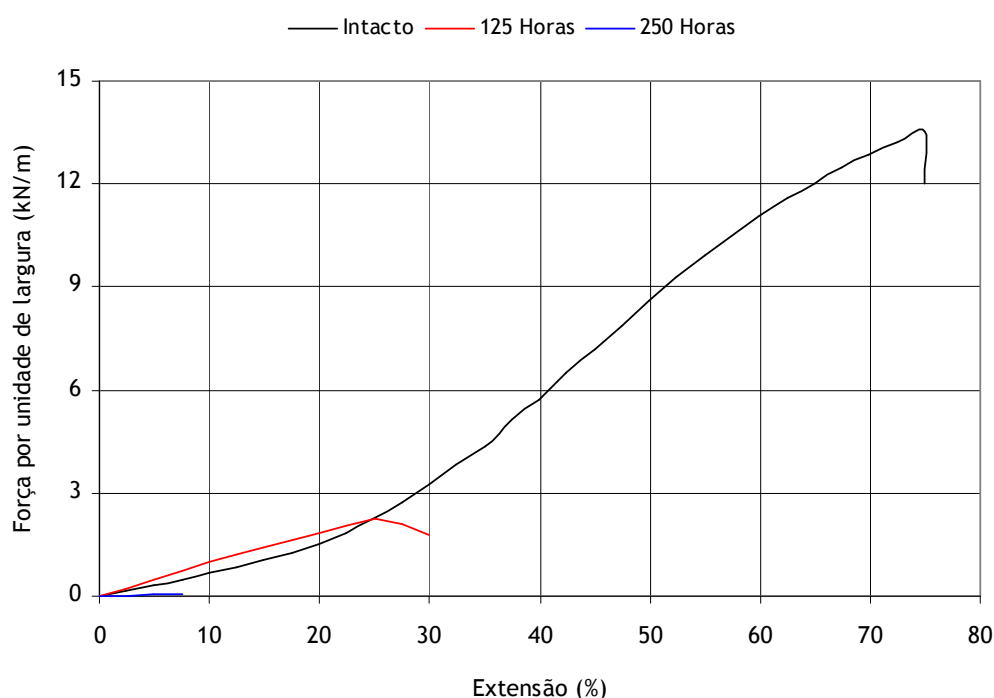


Figura 9.29 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.



O Quadro 9.24 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 9.25. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climatéricos, estão representadas na Figura 9.30.

Quadro 9.24 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos.

| Tempo     | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto   | 26,2 (14%)                                   | 75,0 (10%)                   | ---                      |
| 125 Horas | 8,30 (34%)                                   | 29,6 (16%)                   | <b>31,7</b>              |
| 250 Horas | 1,33 (52%)                                   | 10,3 (36%)                   | <b>5,1</b>               |
| 500 Horas | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.25 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos.

| Tempo     | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-----------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto   | 27,0  | 30,2  | 31,3   | 35,3   | 1117                            | ---                   |
| 125 Horas | 31,7  | 33,6  | 32,9   | 30,0   | 117                             | <b>10,5</b>           |
| 250 Horas | 20,4  | 17,3  | 9,1  | ---  | 9,1                             | <b>0,8</b>            |
| 500 Horas | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |

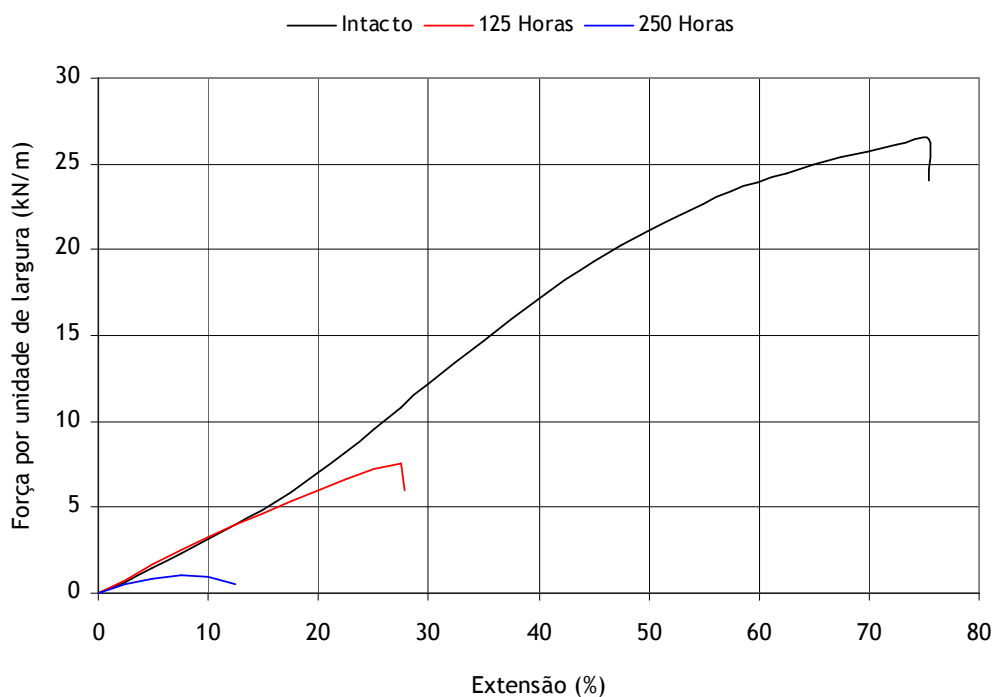


Figura 9.30 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos.

A resistência à tracção dos geotêxteis B0-280 e B0-500 sofreu uma grande diminuição após 125 horas de exposição ao ciclo C44 (resistências residuais de 20,1% e de 31,7%, respectivamente). Ao fim de 250 horas de exposição, os materiais estavam praticamente destruídos (resistência residual de 0,4% para o geotêxtil B0-280 e de 5,1% para o geotêxtil B0-500). A extensão na força máxima diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos. A robustez dos materiais também sofreu uma grande redução após a exposição no QUV (diminuição tanto maior quanto maior o tempo de exposição).

### 9.3.2.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500

Os geotêxteis B2-280 e B2-500 não possuíam sinais visíveis de degradação após 250 e 500 horas de exposição aos agentes climáticos. No entanto, após 1000 horas de exposição, a presença de danos nos materiais era facilmente perceptível (libertação de fibras degradadas, diminuição da espessura, os materiais estavam visivelmente mais frágeis). Após 2000 horas de exposição, o geotêxtil B2-280 estava totalmente destruído (transformado em pequenos pedaços e/ou em pó) e o geotêxtil B2-500 estava seriamente danificado (podia ser facilmente transformado em pedaços) (Figura 9.31). Ao fim de 4000 horas, o geotêxtil B2-500 estava completamente destruído.

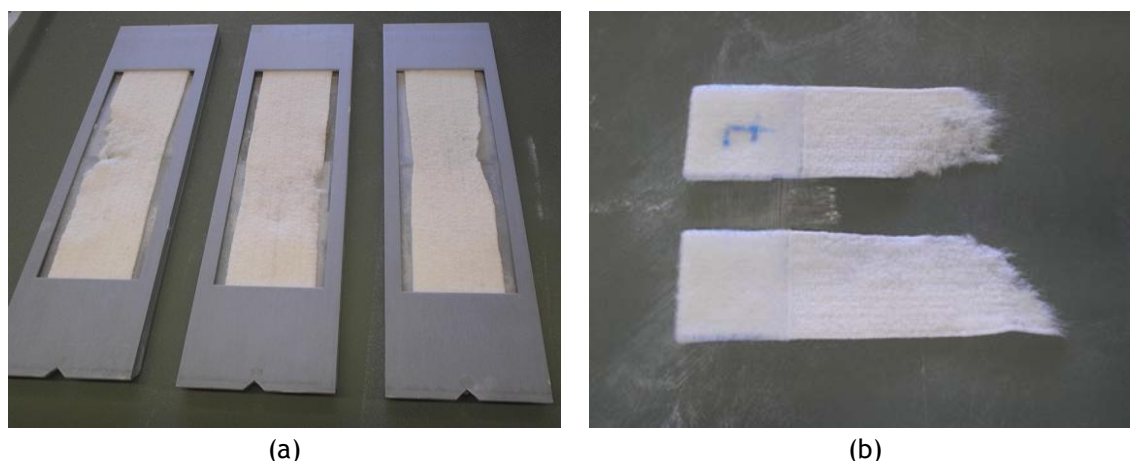


Figura 9.31 - Aspecto do geotêxtil B2-500 após 2000 horas de exposição ao ciclo C44: (a) aspecto geral dos provetes; (b) provete manualmente destruído.

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV, encontram-se resumidos no Quadro 9.26. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão no Quadro 9.27. A Figura 9.32 ilustra as curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os vários ensaios climáticos.

O Quadro 9.28 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.29. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos, encontram-se representadas na Figura 9.33.

Quadro 9.26 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 13,5 (12%)                                   | 78,4 (6,6%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 9,63 (14%)                                   | 50,9 (7,2%)                  | <b>71,3</b>              |
| 500 Horas  | 5,85 (11%)                                   | 40,4 (6,3%)                  | <b>43,3</b>              |
| 1000 Horas | 1,14 (43%)                                   | 21,1 (13%)                   | <b>8,4</b>               |
| 2000 Horas | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.27 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | $J_{SEC} 2\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 5\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 10\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 20\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>residual (%) |
|------------|---|---|--|--|------------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 5,9                                     | 6,7                                     | 7,0                                      | 8,1                                      | 478                                | ---                      |
| 250 Horas  | 7,7                                     | 10,0                                    | 12,8                                     | 16,3                                     | 234                                | <b>49,0</b>              |
| 500 Horas  | 5,8                                     | 8,9                                     | 12,3                                     | 14,5                                     | 113                                | <b>23,6</b>              |
| 1000 Horas | 4,4                                     | 5,2                                     | 5,8                                      | 5,1                                      | 13,4                               | <b>2,8</b>               |
| 2000 Horas | ---                                     | ---                                     | ---                                      | ---                                      | 0                                  | <b>0</b>                 |

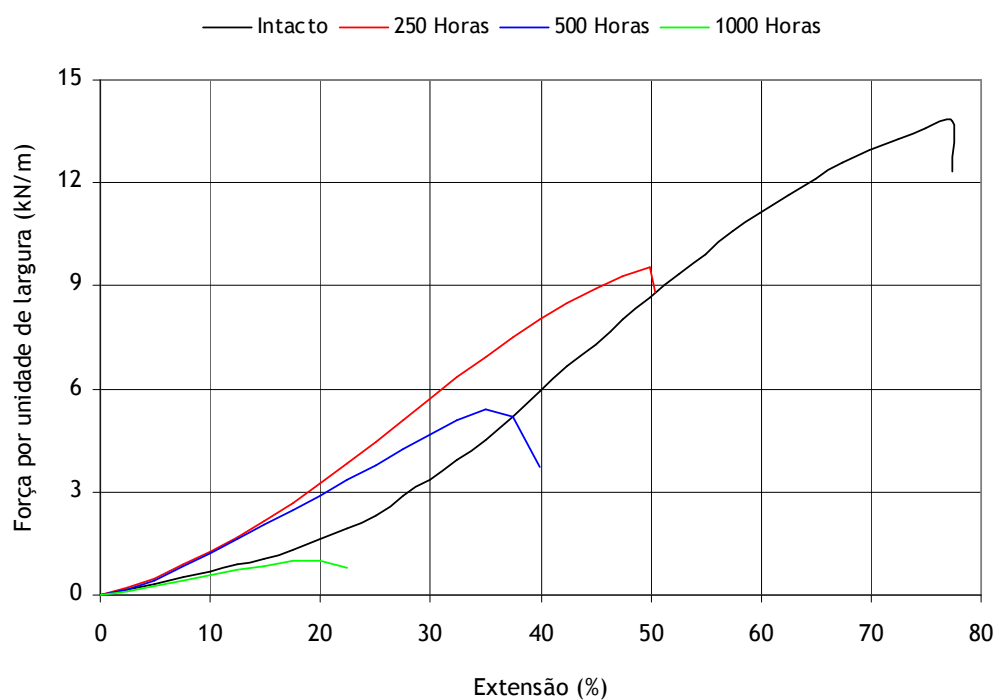


Figura 9.32 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

Quadro 9.28 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 21,7 (9,0%)                                  | 55,4 (4,4%)                  | <b>81,6</b>              |
| 500 Horas  | 16,4 (11%)                                   | 37,8 (5,0%)                  | <b>61,7</b>              |
| 1000 Horas | 8,39 (15%)                                   | 27,2 (11%)                   | <b>31,5</b>              |
| 2000 Horas | 0,79 (16%)                                   | 9,1 (27%)                    | <b>3,0</b>               |
| 4000 Horas | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.29 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 32,5  | 35,1  | 35,9   | 40,0   | 1076                            | ---                   |
| 250 Horas  | 32,5  | 35,9  | 38,5   | 42,5   | 597                             | <b>55,5</b>           |
| 500 Horas  | 33,2  | 39,6  | 42,6   | 45,0   | 282                             | <b>26,2</b>           |
| 1000 Horas | 26,7  | 30,8  | 32,6   | 32,9   | 101                             | <b>9,4</b>            |
| 2000 Horas | 10,3  | 10,5  | ---  | ---  | 4,2                             | <b>0,4</b>            |
| 4000 Horas | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |

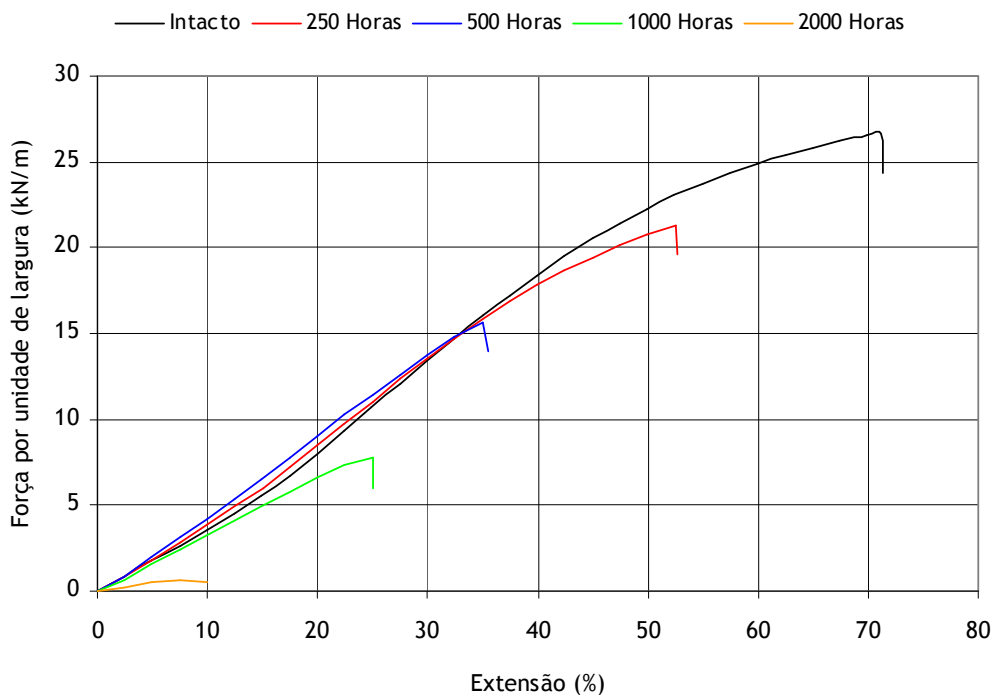


Figura 9.33 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

A resistência à tracção dos geotêxteis estabilizados com 0,2% de C944 diminuiu após a exposição aos agentes climáticos. Ao fim de 250 horas, o geotêxtil B2-280 apresentava uma resistência residual de 71,3% e o geotêxtil B2-500 possuía uma resistência residual de 81,6%. O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos (maior radiação incidente total) provocou a redução gradual da resistência à tracção dos materiais. De facto, após 1000 horas, geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam resistências residuais de 8,4% e 31,5%, respectivamente. Ao fim de 2000 horas, o geotêxtil B2-280 estava destruído (resistência à tracção nula) e o geotêxtil B2-500 estava próximo da destruição total (resistência residual de apenas 3,0%).

A extensão na força máxima dos geotêxteis B2-280 e B2-500 sofreu uma diminuição após a exposição aos agentes climáticos (redução tanto maior quanto maior o tempo de exposição). Ao fim de 1000 horas, o geotêxtil B2-280 apresentava uma extensão na força máxima de 21,1% (extensão original de 78,4%) e o geotêxtil B2-500 possuía uma extensão na força máxima de 27,2% (extensão original de 71,6%).

A robustez dos geotêxteis com 0,2% de C944 também sofreu uma grande redução após a exposição aos agentes climáticos. Ao fim de 250 horas, os geotêxteis B2-280 e B2-500 apresentavam uma robustez residual de 49,0% e de 55,5%, respectivamente. A robustez dos materiais diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos (após 1000 horas, robustez residual de 2,8% para o geotêxtil B2-280 e robustez residual de 9,4% para o geotêxtil B2-500).

A degradação ocorrida no geotêxtil B2-280 durante 1000 horas de exposição ao ciclo C44 (resistência residual de 8,4%, extensão na força máxima de 21,1% e robustez residual de 2,8%) foi semelhante à degradação ocorrida durante as 500 horas do ensaio E80 (resistência residual de 10,0%, extensão na força máxima de 22,1% e robustez residual de 4,0%). Embora possuam diferentes durações totais, o tempo total de exposição à radiação UV (489,8 horas) é igual nos dois ensaios (o restante tempo de ensaio corresponde a passos de chuva e de condensação). Assim, a degradação causada pelos passos de chuva e de condensação, a existir, é muito pouco significativa (a exposição adicional do geotêxtil B2-280 a 489,8 horas de condensação não lhe causou uma degradação significativamente maior que a degradação existente após o ensaio climático E80). Deste modo, o passo de exposição à radiação UV é o principal responsável pela degradação dos geotêxteis durante os ensaios climáticos no QUV (a degradação é tanto maior quanto maior o tempo de exposição à radiação UV). A comparação dos resultados obtidos para o geotêxtil B2-500 após 1000 horas de exposição ao ciclo C44 e no final do ensaio climático E80 originaria as mesmas conclusões.

A degradação ocorrida no geotêxtil B2-500 durante a exposição aos agentes climáticos foi menor que a degradação observada no geotêxtil B2-280, confirmando que os geotêxteis com maior massa por unidade de área (e espessura) apresentam uma maior resistência à degradação provocada pelos agentes climáticos (pelos motivos já anteriormente referidos).

A presença de 0,2% de C944 nas fibras de PP originou um aumento muito significativo da resistência dos materiais aos agentes climáticos. De facto, na ausência do aditivo C944, os materiais estariam praticamente destruídos ao fim de 250 horas de exposição no QUV.

**9.3.2.4 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500**

Os geotêxteis B4-280 e B4-500 não possuíam sinais de degradação após 250 e 500 horas de exposição aos agentes climáticos. No entanto, ao fim de 1000 horas, a passagem da mão por alguns provetes originava a libertação (em pequena quantidade) de fibras degradadas (a maioria dos provetes ainda não apresentava sinais de degradação). Após 2000 horas, a existência de danificação nos materiais era facilmente visível (libertação de grande quantidade de fibras degradadas, materiais mais frágeis e com menor espessura). Ao fim de 4000 horas, os geotêxteis B4-280 e B4-500 estavam destruídos.

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos, podem ser encontrados no Quadro 9.30. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.31. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B4-280, antes e após a exposição aos agentes climáticos, encontram-se ilustradas na Figura 9.34.

O Quadro 9.32 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.33. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500 encontram-se representadas na Figura 9.35.

Quadro 9.30 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 13,3 (12%)                                  | 75,8 (8,0%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 13,1 (14%)                                  | 58,4 (6,3%)                  | <b>98,5</b>              |
| 500 Horas  | 10,7 (8,6%)                                 | 48,3 (6,0%)                  | <b>80,5</b>              |
| 1000 Horas | 4,26 (21%)                                  | 30,1 (8,0%)                  | <b>32,0</b>              |
| 2000 Horas | 1,19 (56%)                                  | 15,5 (18%)                   | <b>8,9</b>               |
| 4000 Horas | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.31 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 6,0                                       | 7,2                                       | 7,3  | 8,7  | 453                            | ---                   |
| 250 Horas  | 7,8                                       | 10,6                                      | 13,5                                       | 17,6                                       | 391                            | <b>86,3</b>           |
| 500 Horas  | 8,2                                       | 11,5                                      | 15,4                                       | 19,6                                       | 267                            | <b>58,9</b>           |
| 1000 Horas | 7,8                                       | 10,5                                      | 12,7                                       | 14,5                                       | 61,4                           | <b>13,6</b>           |
| 2000 Horas | 5,8                                       | 7,1                                       | 7,5  | ---  | 10,3                           | <b>2,3</b>            |
| 4000 Horas | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

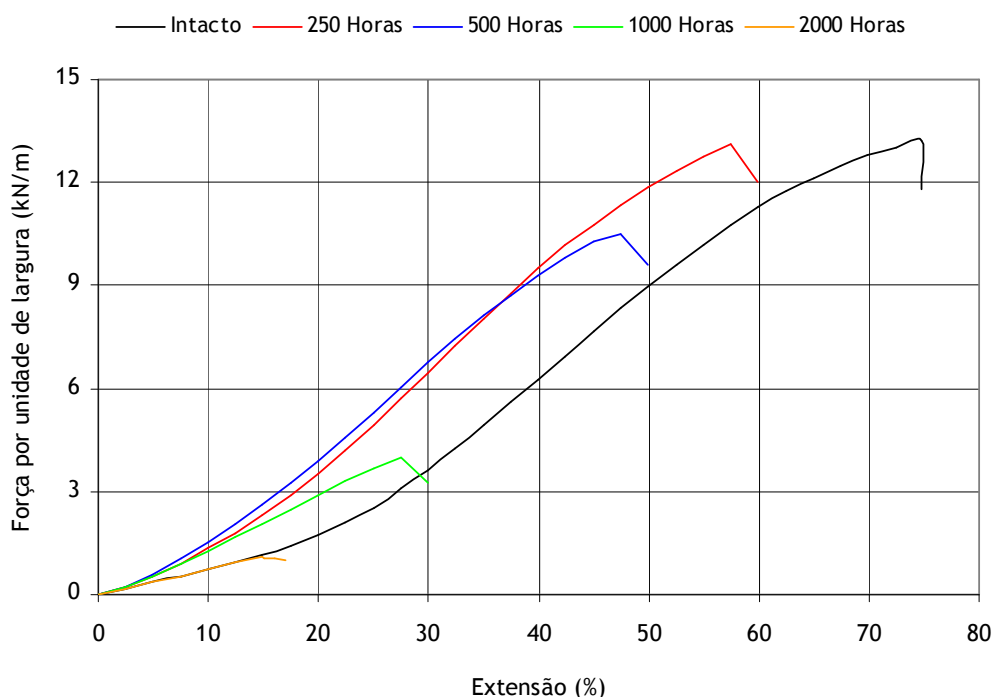


Figura 9.34 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

Quadro 9.32 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| 250 Horas  | 27,1 (12%)                                   | 54,1 (6,3%)                  | <b>98,2</b>              |
| 500 Horas  | 26,4 (13%)                                   | 54,3 (5,6%)                  | <b>95,7</b>              |
| 1000 Horas | 14,8 (16%)                                   | 35,1 (6,9%)                  | <b>53,6</b>              |
| 2000 Horas | 7,16 (14%)                                   | 19,0 (4,9%)                  | <b>25,9</b>              |
| 4000 Horas | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.33 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| 250 Horas  | 42,5  | 49,0  | 52,4   | 56,1   | 779                             | <b>65,6</b>           |
| 500 Horas  | 40,5  | 46,6  | 50,0   | 53,8   | 751                             | <b>63,2</b>           |
| 1000 Horas | 37,8  | 41,0  | 43,3   | 45,1   | 268                             | <b>22,6</b>           |
| 2000 Horas | 44,2  | 46,2  | 44,1   | ---  | 79,8                            | <b>6,7</b>            |
| 4000 Horas | ---   | ---   | ---  | ---  | 0                               | <b>0</b>              |

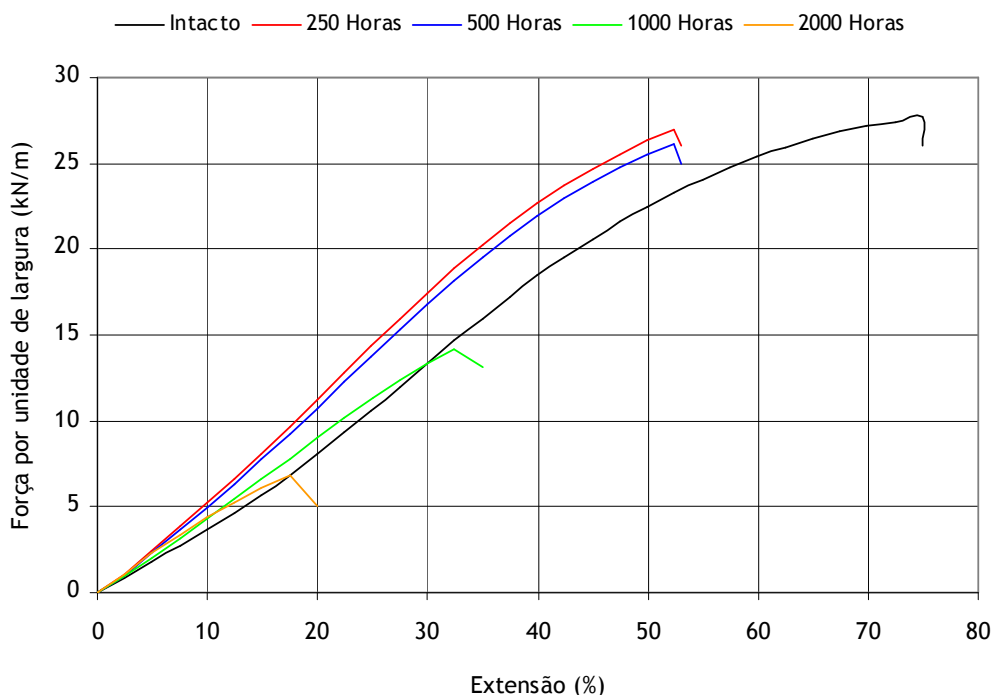


Figura 9.35 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

A resistência à tracção dos geotêxteis B4-280 e B4-500 não sofreu grandes alterações após 250 horas de exposição no QUV (resistências residuais de 98,5% e de 98,2%, respectivamente). Mesmo ao fim de 500 horas, os geotêxteis B4-280 e B4-500 ainda possuíam resistências residuais elevadas (80,5% e 95,7%, respectivamente). O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos provocou uma grande diminuição da resistência dos materiais. De facto, após 2000 horas, as resistências residuais dos geotêxteis B4-280 e B4-500 eram de 8,9% e de 25,9%, respectivamente. Ao fim de 4000 horas, ambos os materiais apresentavam uma resistência à tracção nula.

A extensão na força máxima e a robustez dos geotêxteis B4-280 e B4-500 diminuíram à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos. De um modo geral, os valores da rigidez secante dos geotêxteis B4-280 e B4-500 após os ensaios climáticos foram superiores aos valores de referência (excepção para o geotêxtil B4-280 ao fim de 2000 horas de exposição).

A degradação ocorrida no geotêxtil B4-280 durante 1000 horas de exposição ao ciclo C44 (resistência residual de 32,0%, extensão na força máxima de 30,1% e robustez residual de 13,6%) foi um pouco superior à degradação observada durante as 500 horas do ensaio E80 (resistência residual de 38,0%, extensão na força máxima de 32,5% e robustez residual de 19,1%) (489,8 horas de exposição UV em ambos os ensaios). Assim, parece existir alguma degradação extra (embora relativamente pequena) provocada pelo passo de condensação (passo inexistente no ensaio climático E80) (a ocorrência de degradação durante o passo de condensação não foi tão evidente quando comparados os resultados obtidos para os geotêxteis com 0,2% de C944). De qualquer modo, o passo de exposição à radiação UV é o principal responsável pela degradação dos geotêxteis nos ensaios climáticos. A comparação dos resultados obtidos para o geotêxtil B4-500 levaria a conclusões idênticas.



A incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos materiais contra os agentes climáticos. De facto, após 2000 horas, o geotêxtil B4-280 possuía uma resistência residual de 8,9% (geotêxtil B2-280 totalmente destruído), enquanto que o geotêxtil B4-500 apresentava uma resistência residual de 25,9% (geotêxtil B2-500 muito perto da degradação completa, resistência residual de apenas 3,0%).

### 9.3.2.5 - Geotêxteis estabilizados com Chimassorb 944 e negro de carbono: P2-280 e P2-500

Os geotêxteis pretos não possuíam sinais de degradação após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. Mesmo ao fim de 4000 horas de exposição (radiação incidente total de 4,80 MJ.m<sup>-2</sup> a 340 nm), não foram detectados danos visíveis nos geotêxteis P2-280 e P2-500, o que, desde logo, mostrou a boa resistência dos materiais aos agentes climáticos simulados em laboratório.

As propriedades mecânicas do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV, encontram-se resumidas nos Quadros 9.34 e 9.35. As respectivas curvas médias força-extensão estão ilustradas na Figura 9.36.

Do mesmo modo, as propriedades mecânicas do geotêxtil P2-500 encontram-se resumidas no Quadro 9.36 e no Quadro 9.37. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos, estão representadas na Figura 9.37.

Quadro 9.34 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 15,3 (10%)                                  | 54,6 (8,3%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 15,3 (11%)                                  | 52,1 (9,3%)                  | <b>100</b>               |
| 500 Horas  | 15,2 (6,5%)                                 | 49,3 (7,5%)                  | <b>99,3</b>              |
| 1000 Horas | 15,4 (9,2%)                                 | 44,3 (3,1%)                  | <b>101</b>               |
| 2000 Horas | 15,1 (9,4%)                                 | 36,6 (6,0%)                  | <b>98,7</b>              |
| 4000 Horas | 11,4 (3,4%)                                 | 34,3 (3,0%)                  | <b>74,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.35 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 11,8                                      | 14,0                                      | 14,1                                       | 18,5                                       | 381                            | ---                   |
| 250 Horas  | 9,2                                       | 12,8                                      | 14,0                                       | 18,6                                       | 332                            | <b>87,1</b>           |
| 500 Horas  | 10,4                                      | 14,5                                      | 15,8                                       | 20,5                                       | 322                            | <b>84,5</b>           |
| 1000 Horas | 11,1                                      | 15,4                                      | 16,9                                       | 21,6                                       | 302                            | <b>79,3</b>           |
| 2000 Horas | 14,0                                      | 23,4                                      | 31,2                                       | 38,9                                       | 261                            | <b>68,5</b>           |
| 4000 Horas | 11,7                                      | 18,0                                      | 24,1                                       | 31,4                                       | 167                            | <b>43,8</b>           |

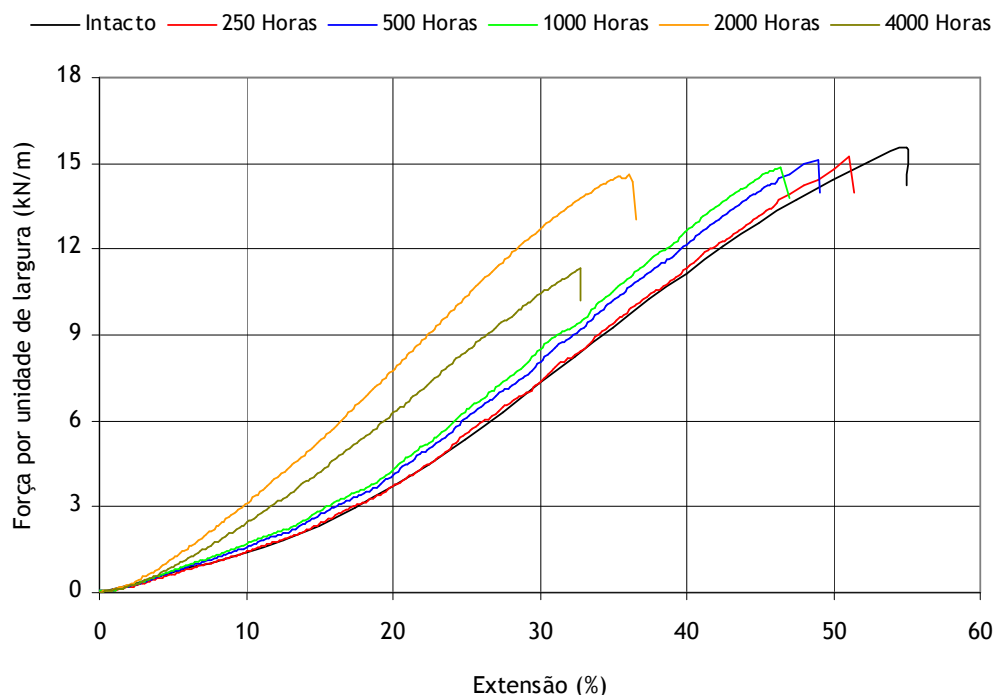


Figura 9.36 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

Quadro 9.36 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 25,6 (12%)                                   | 63,0 (9,0%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 26,1 (9,6%)                                  | 59,9 (4,1%)                  | <b>102</b>               |
| 500 Horas  | 25,9 (8,6%)                                  | 59,8 (3,6%)                  | <b>101</b>               |
| 1000 Horas | 27,6 (9,2%)                                  | 59,4 (9,1%)                  | <b>108</b>               |
| 2000 Horas | 22,6 (11%)                                   | 41,9 (5,4%)                  | <b>88,3</b>              |
| 4000 Horas | 17,5 (7,5%)                                  | 38,8 (3,0%)                  | <b>68,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.37 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 31,0  | 33,8  | 35,1   | 39,7   | 848                             | ---                   |
| 250 Horas  | 27,5  | 32,9  | 36,5   | 41,8   | 796                             | <b>93,9</b>           |
| 500 Horas  | 27,7  | 33,1  | 36,6   | 41,8   | 788                             | <b>92,9</b>           |
| 1000 Horas | 30,0  | 35,6  | 39,4   | 45,2   | 832                             | <b>98,1</b>           |
| 2000 Horas | 36,7  | 46,8  | 52,1   | 57,5   | 447                             | <b>52,7</b>           |
| 4000 Horas | 27,6  | 36,1  | 41,8   | 46,5   | 334                             | <b>39,4</b>           |

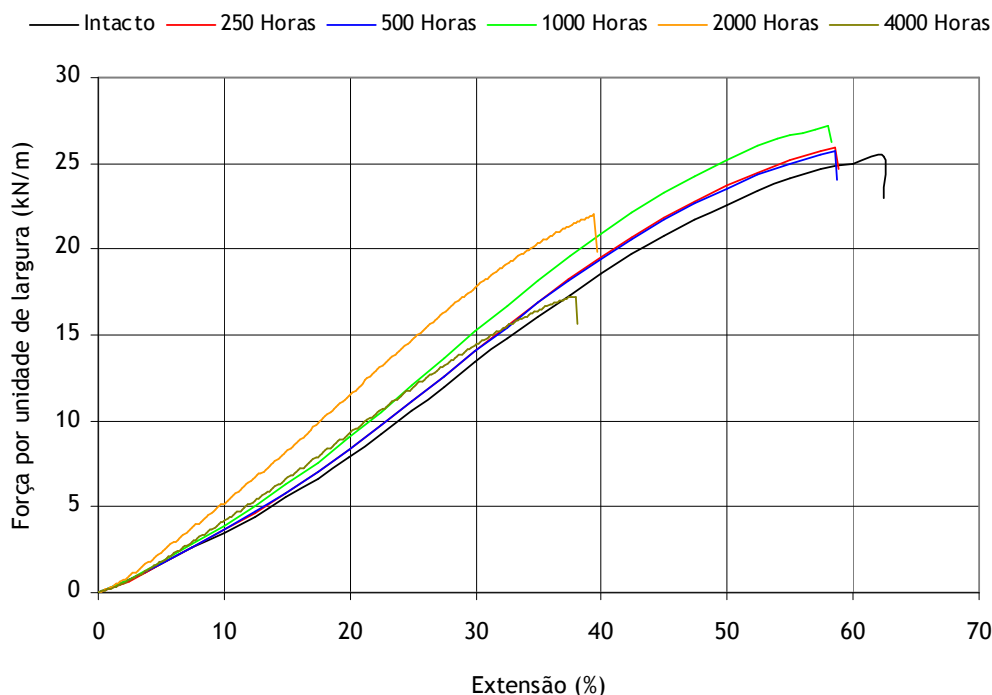


Figura 9.37 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

A resistência à tracção dos geotêxteis P2-280 e P2-500 não sofreu grandes alterações após 250, 500 e 1000 horas de exposição no QUV (ao fim de 1000 horas, resistências residuais de 101% e de 108% para os geotêxteis P2-280 e P2-500, respectivamente). Após 2000 horas, a resistência à tracção do geotêxtil P2-280 mantinha-se praticamente inalterada (resistência residual de 98,7%), enquanto que a resistência à tracção do geotêxtil P2-500 sofreu uma pequena diminuição (resistência residual de 88,3%). O aumento do tempo de exposição das 2000 para as 4000 horas provocou uma diminuição da resistência à tracção dos geotêxteis pretos (resistência residual de 74,5% para o geotêxtil P2-280 e resistência residual de 68,4% para o geotêxtil P2-500).

De um modo geral, a extensão na força máxima e a robustez dos geotêxteis pretos diminuíram com o aumento do tempo de exposição no QUV. Após 4000 horas, os geotêxteis P2-280 e P2-500 possuíam uma robustez residual de 43,8% e de 39,4%, respectivamente; extensões na força máxima de 34,3% para o geotêxtil P2-280 (extensão original de 54,6%) e de 38,8 % para o geotêxtil P2-500 (extensão original de 63,0%). Ao fim de 2000 e 4000 horas, os valores da rigidez secante (a 5%, 10% e 20%) dos materiais eram superiores aos valores de referência.

A resistência do geotêxtil P2-280 aos agentes climáticos (após 2000 e 4000 horas) foi ligeiramente superior à resistência do geotêxtil P2-500. Assim, e ao contrário do que seria de esperar, o geotêxtil com menor massa por unidade de área (menor espessura) foi mais resistente aos agentes em causa.

Os geotêxteis P2-280 e P2-500 apresentaram uma excelente resistência aos agentes climáticos. De facto, após 4000 horas, os materiais ainda possuíam resistências residuais relativamente elevadas, enquanto que os restantes geotêxteis estavam destruídos. A incorporação de negro de carbono nos geotêxteis aumentou substancialmente a sua resistência aos agentes climáticos artificiais.

### 9.3.2.6 - Comparação da resistência dos geotêxteis a diferentes tempos de exposição no QUV

A resistência dos geotêxteis de PP aos diferentes tempos de exposição no QUV variou de acordo com a composição química dos materiais. A Figura 9.38 compara as resistências residuais dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. Do mesmo modo, a Figura 9.39 compara as resistências residuais dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup>.

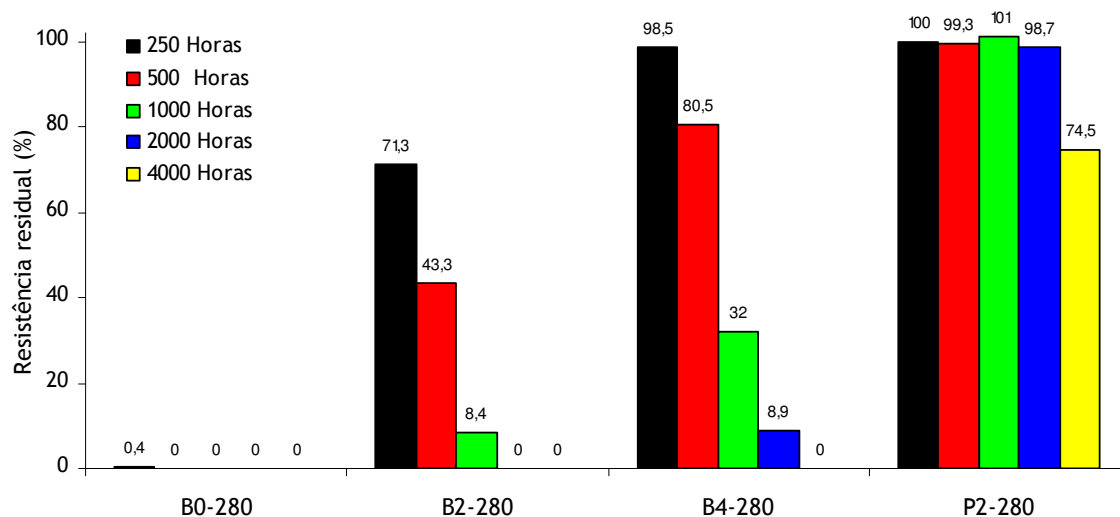


Figura 9.38 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

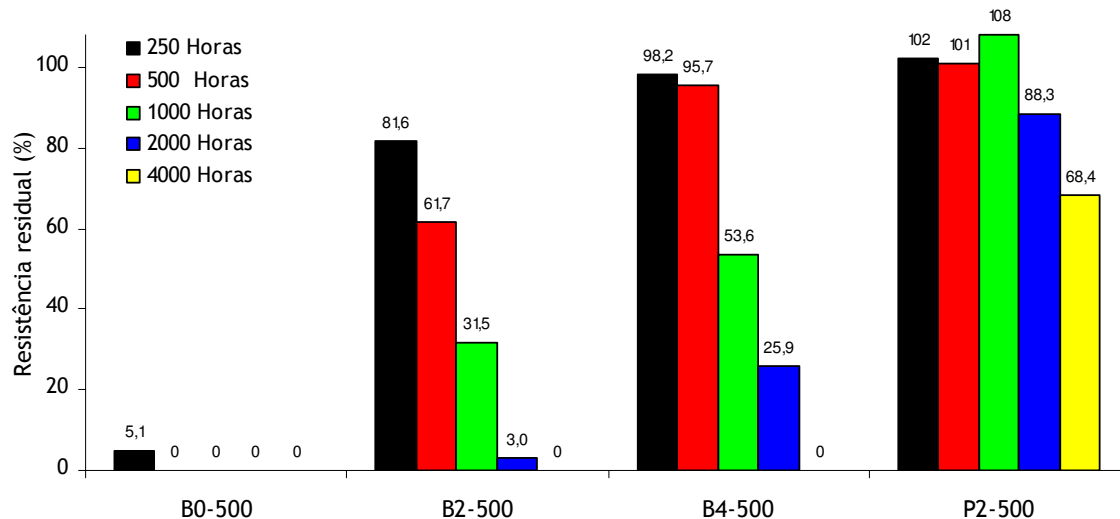


Figura 9.39 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

Os geotêxteis não estabilizados apresentaram uma resistência muito baixa aos agentes climáticos simulados em laboratório (destruição quase completa após 250 horas de exposição). A degradação dos geotêxteis de PP foi bastante retardada pela incorporação do aditivo C944 nos materiais (maior protecção quanto maior a quantidade de C944 existente nos geotêxteis). A incorporação de negro de carbono originou um aumento muito significativo da resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos simulados em laboratório.

### 9.3.3 - Efeito da temperatura do passo de exposição UV na resistência dos geotêxteis

#### 9.3.3.1 - Características particulares dos ensaios

Os geotêxteis foram expostos a 3 ensaios climatéricos de 500 horas (UV50, UV60 e UV70), em que se variou a temperatura (50 °C, 60 °C e 70 °C) do passo de exposição à radiação UV (Quadro 9.38) (o ensaio UV60 corresponde ao ensaio E62 apresentado no ponto 9.3.1). As designações atribuídas aos diferentes ensaios contêm informação sobre a temperatura (em °C) de exposição à radiação UV. Por exemplo, no ensaio UV50, os geotêxteis foram expostos à radiação UV a uma temperatura de 50 °C.

Quadro 9.38 - Ciclo climatérico usado nos ensaios UV50, UV60 e UV70.

|   |
|---|
| Passo 1: Exposição à radiação UV (temperatura variável) (6 horas) |
| Passo 2: Chuva (choque térmico) (10 minutos)                      |
| Passo 3: Condensação (45 °C) (2 horas)                            |
| (retorno ao passo 1)  |

A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm. A radiação incidente total durante as 500 horas de ensaio foi de  $0,90 \text{ MJ.m}^{-2}$  a 340 nm e de  $51,84 \text{ MJ.m}^{-2}$  entre os 290 nm e os 400 nm. Os materiais foram expostos a cerca de 61 ciclos climatéricos durante as 500 horas de ensaio. Os ensaios climatéricos com diferentes temperaturas de exposição à radiação UV foram realizados para os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500.

#### 9.3.3.2 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500

Os geotêxteis B2-280 e B2-500 não possuíam sinais visíveis de degradação após o ensaio climatérico UV50. O aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV provocou o aparecimento de danos nos materiais. De facto, no fim do ensaio UV60, a existência de degradação nos materiais era facilmente visível (libertação de algumas fibras degradadas). Depois do ensaio UV70, os geotêxteis libertavam uma grande quantidade de fibras degradadas, apresentavam menor espessura e estavam muito mais frágeis (o geotêxtil B2-280 podia ser facilmente reduzido a pequenos pedaços ou a pó).

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70, encontram-se resumidas no Quadro 9.39 e no Quadro 9.40. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e depois dos ensaios climatéricos, estão ilustradas na Figura 9.40.

Quadro 9.39 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climatérico | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 13,5 (12%)                                   | 78,4 (6,6%)                  | ---                      |
| UV50               | 5,96 (12%)                                   | 45,3 (6,5%)                  | 44,1                     |
| UV60               | 3,52 (28%)                                   | 34,1 (6,7%)                  | 26,1                     |
| UV70               | 0,24 (14%)                                   | 12,7 (15%)                   | 1,8                      |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.40 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 5,9                                       | 6,7                                       | 7,0  | 8,1  | 478                            | ---                   |
| UV50             | 3,5                                       | 5,6                                       | 8,2  | 10,9                                       | 115                            | <b>24,1</b>           |
| UV60             | 6,0                                       | 8,3                                       | 10,1                                       | 10,9                                       | 62,6                           | <b>13,1</b>           |
| UV70             | 1,5                                       | 2,0                                       | 2,1  | ---  | 1,8                            | <b>0,4</b>            |

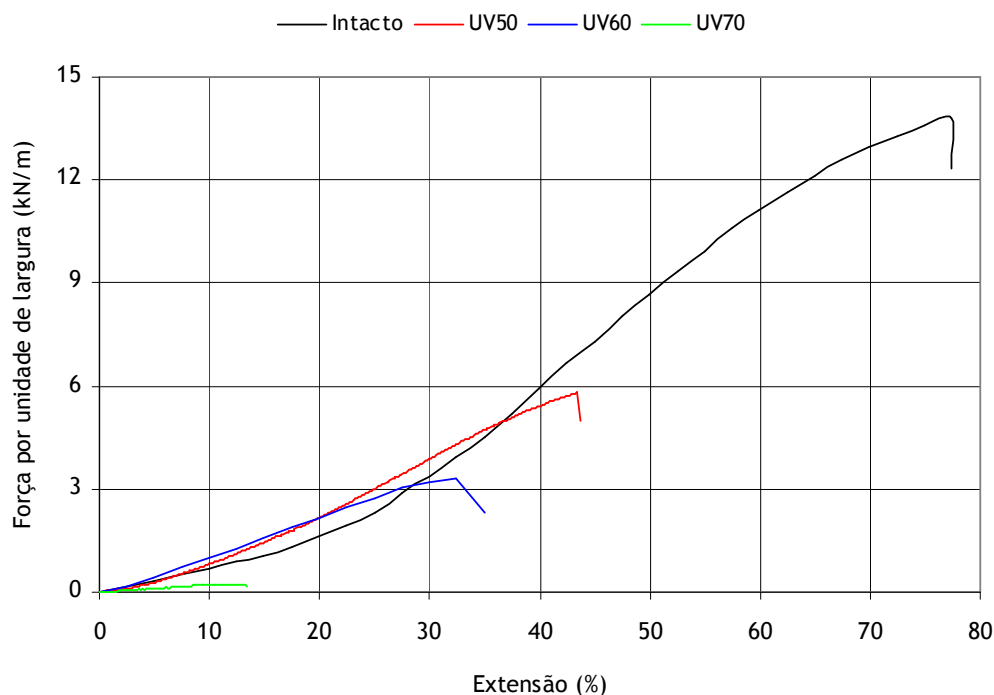


Figura 9.40 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70, podem ser encontrados no Quadro 9.41. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.42. As curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70, estão representadas na Figura 9.41.

Quadro 9.41 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 26,6 (11%)                                  | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| UV50             | 15,4 (6,1%)                                 | 44,5 (11%)                   | <b>57,9</b>              |
| UV60             | 12,4 (21%)                                  | 30,9 (7,5%)                  | <b>46,6</b>              |
| UV70             | 8,52 (19%)                                  | 27,2 (16%)                   | <b>32,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.42 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 32,5                                      | 35,1                                      | 35,9                                       | 40,0                                       | 1076                           | ---                   |
| UV50             | 19,8                                      | 26,9                                      | 31,4                                       | 35,8                                       | 323                            | 30,0                  |
| UV60             | 32,9                                      | 38,8                                      | 41,5                                       | 42,5                                       | 190                            | 17,7                  |
| UV70             | 24,6                                      | 30,9                                      | 33,5                                       | 33,6                                       | 96,7                           | 9,0                   |

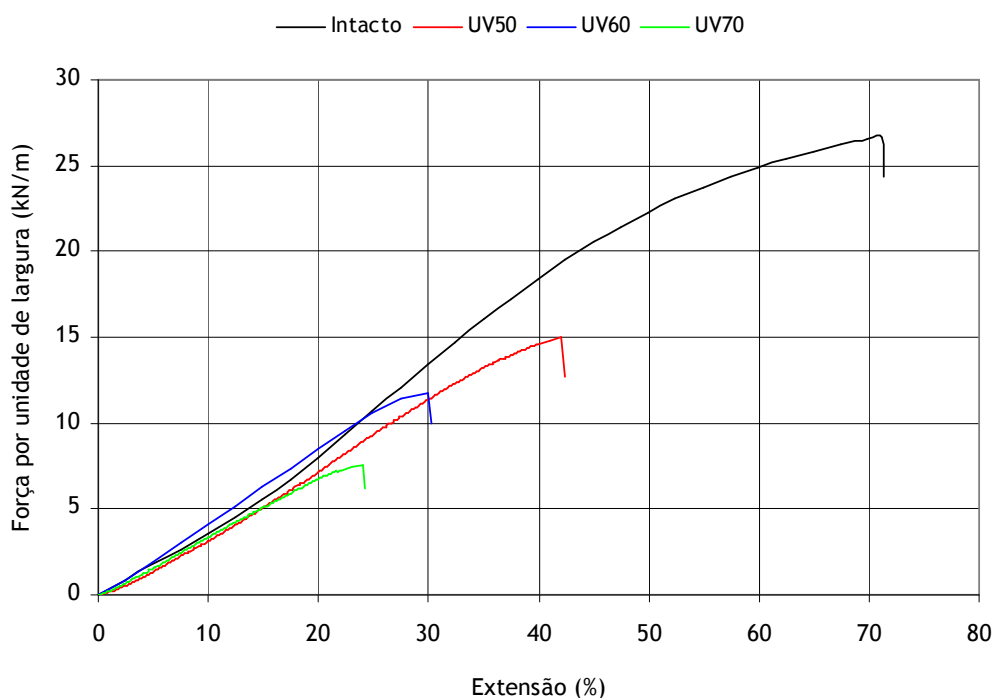


Figura 9.41 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

A resistência à tração dos geotêxteis B2-280 e B2-500 diminuiu com o aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV. De facto, o geotêxtil B2-280 possuía uma resistência residual de 44,1% após o ensaio UV50 e uma resistência residual de apenas 1,8% após o ensaio UV70. Do mesmo modo, o geotêxtil B2-500 apresentava resistências residuais de 57,9% e de 32,0% no final dos ensaios UV50 e UV70, respectivamente. A extensão na força máxima e a robustez dos geotêxteis B2-280 e B2-500 também diminuíram com o aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV. Assim, o aumento da temperatura causou um agravamento considerável da degradação sofrida pelos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante o passo de exposição à radiação UV.

#### 9.3.3.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500

Os geotêxteis B4-280 e B4-500 não possuíam sinais visíveis de degradação (tais como a libertação de fibras degradadas ou uma redução visível da espessura) após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70. Assim, e tal como seria de esperar, os geotêxteis com 0,4% de C944 exibiram, desde logo, uma maior resistência aos agentes climáticos do que os geotêxteis com 0,2% de C944.

O Quadro 9.43 apresenta os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após a exposição aos ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.44. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, obtidas antes e após os ensaios climáticos, encontram-se ilustradas na Figura 9.42.

Quadro 9.43 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 13,3 (12%)                                  | 75,8 (8,0%)                  | ---                      |
| UV50             | 10,9 (25%)                                  | 46,8 (7,9%)                  | <b>82,0</b>              |
| UV60             | 6,68 (24%)                                  | 37,1 (11%)                   | <b>50,2</b>              |
| UV70             | 5,10 (15%)                                  | 27,1 (18%)                   | <b>38,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.44 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 6,0                                       | 7,2                                       | 7,3  | 8,7  | 453                            | ---                   |
| UV50             | 7,4                                       | 11,4                                      | 15,6                                       | 20,4                                       | 209                            | <b>46,1</b>           |
| UV60             | 8,6                                       | 11,6                                      | 14,6                                       | 17,4                                       | 134                            | <b>29,6</b>           |
| UV70             | 9,3                                       | 13,7                                      | 17,4                                       | 19,6                                       | 57,1                           | <b>12,6</b>           |

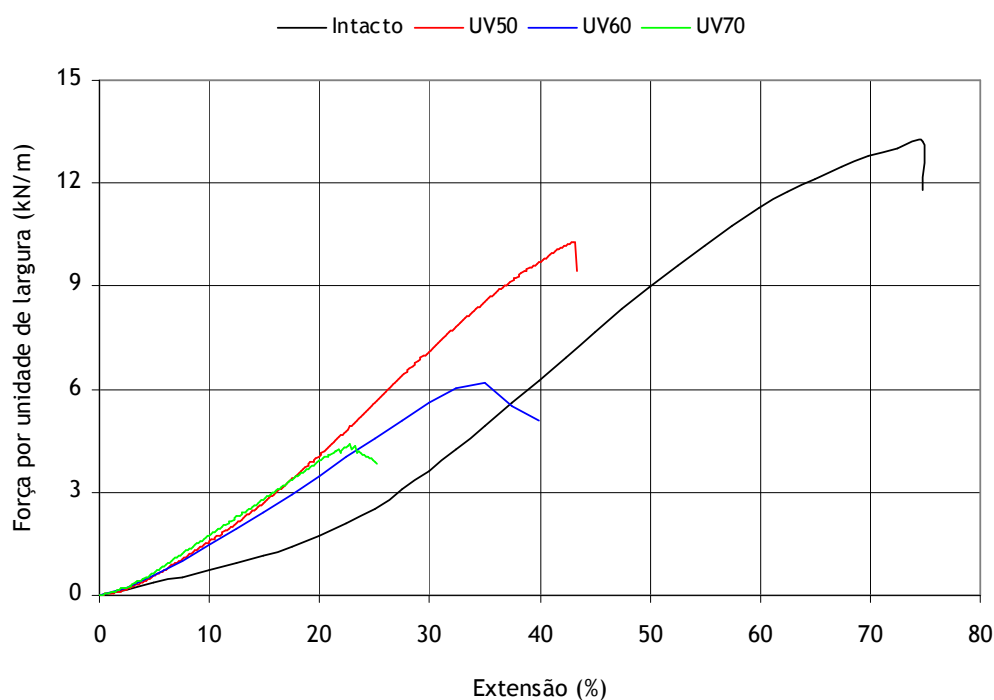


Figura 9.42 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.



O Quadro 9.45 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser encontrados no Quadro 9.46. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70, estão representadas na Figura 9.43.

Quadro 9.45 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climatérico | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| UV50               | 23,9 (14%)                                   | 48,5 (8,4%)                  | <b>86,6</b>              |
| UV60               | 19,3 (17%)                                   | 41,6 (7,2%)                  | <b>69,9</b>              |
| UV70               | 13,8 (5,3%)                                  | 30,1 (13%)                   | <b>50,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.46 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.

| Ensaio climatérico | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| UV50               | 39,1  | 48,4  | 53,3   | 57,4   | 591                             | <b>49,7</b>           |
| UV60               | 36,6  | 43,0  | 46,3   | 49,0   | 369                             | <b>31,1</b>           |
| UV70               | 40,1  | 47,8  | 50,3   | 50,3   | 198                             | <b>16,7</b>           |

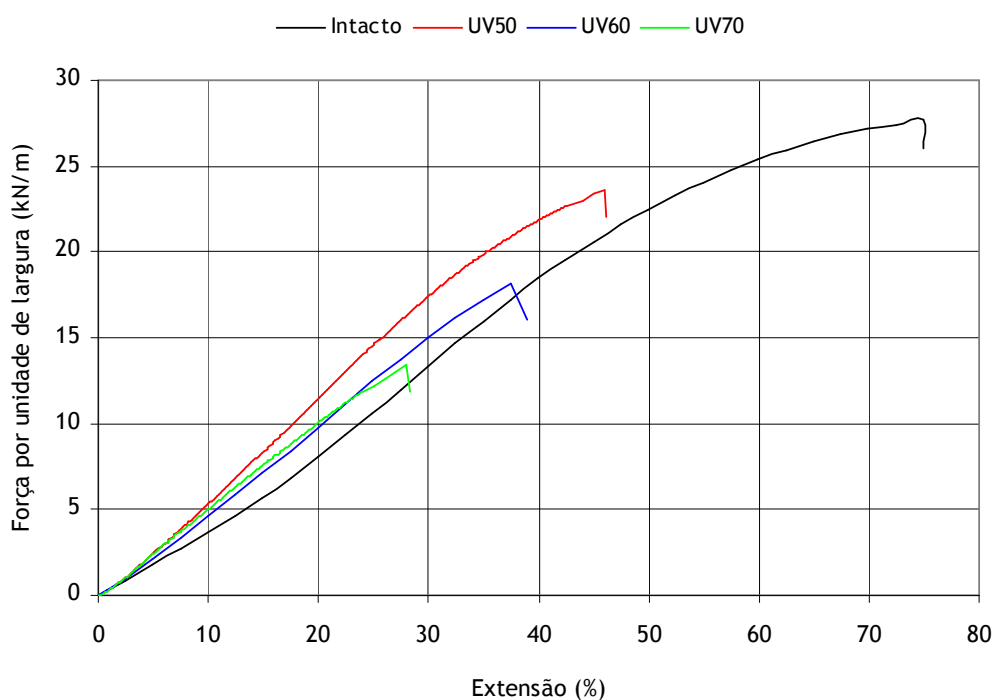


Figura 9.43 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos UV50, UV60 e UV70.

À semelhança dos geotêxteis com 0,2% de C944, a resistência à tracção dos geotêxteis com 0,4% de C944 também diminuiu com o aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV. Após o ensaio climático UV70, o geotêxtil B4-280 possuía uma resistência residual de 38,4% e o geotêxtil B4-500 apresentava uma resistência residual de 50,0% (resistências residuais de 82,0% e 86,6% para os geotêxteis B4-280 e B4-500, respectivamente, depois do ensaio climático UV50). A extensão na força máxima e a robustez também sofreram uma redução com o aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV. Os valores obtidos para a rigidez secante dos provetes expostos foram superiores aos valores de referência.

#### 9.3.3.4 - Comparação da resistência dos geotêxteis às diversas temperaturas de exposição UV

A degradação ocorrida nos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 durante o passo de exposição à radiação UV foi muito dependente da temperatura. A Figura 9.44 resume as resistências residuais dos materiais após os ensaios UV50, UV60 e UV70.

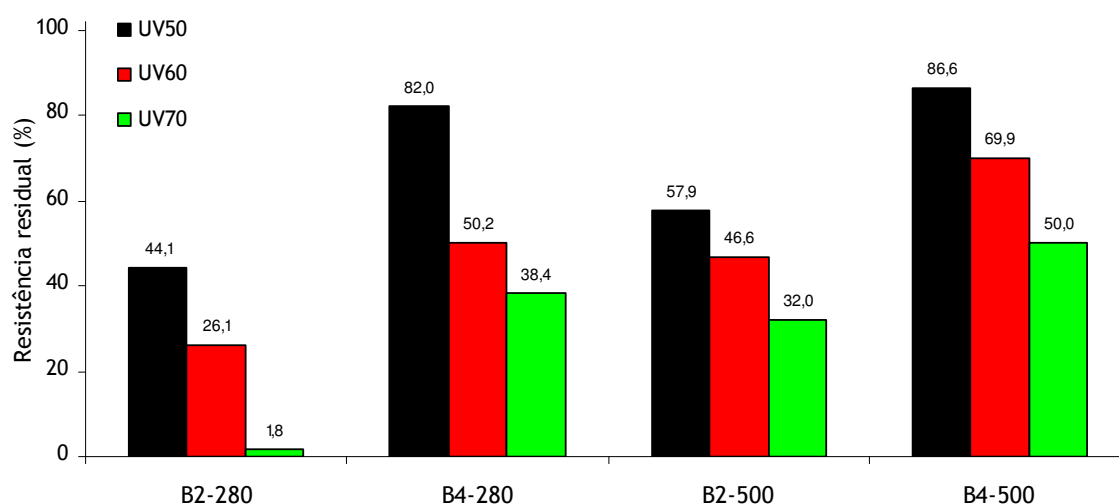


Figura 9.44 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 após os ensaios climáticos UV50, UV60 e UV70.

O aumento da temperatura de exposição à radiação UV provocou um aumento da degradação sofrida pelos geotêxteis de PP. De facto, a resistência à tracção (bem como, a extensão na força máxima e a robustez) dos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 sofreu uma diminuição considerável com o aumento da temperatura do passo de exposição à radiação UV. Assim, o processo de degradação dos materiais (foto-degradação) é tanto mais rápido quanto maior for a temperatura.

A degradação dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> foi superior à degradação dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (comparando materiais produzidos a partir das mesmas fibras), mostrando, mais uma vez, o efeito da massa por unidade de área (e espessura) na resistência dos materiais aos agentes climáticos.

A resistência dos geotêxteis com 0,4% de C944 foi superior à resistência dos geotêxteis com 0,2% de C944 (comparando materiais com massas por unidade de área idênticas), o que indicou, mais uma vez, que o aumento da quantidade de C944 existente nas fibras de PP (de 0,2% para 0,4%) resultou numa maior protecção dos geotêxteis contra a degradação causada pelos agentes climáticos.

### 9.3.4 - Efeito da irradiância durante o passo de exposição UV na resistência dos geotêxteis

#### 9.3.4.1 - Características particulares dos ensaios

Os geotêxteis foram expostos ao mesmo ciclo climático (designado por ciclo C62 no ponto 9.3.1) durante o mesmo intervalo de tempo (500 horas), mas com diferentes irradiâncias ( $0,68 \text{ W.m}^{-2}$ ,  $0,87 \text{ W.m}^{-2}$  e  $1,03 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm) durante o passo de exposição à radiação UV. O Quadro 9.47 resume as designações atribuídas aos diferentes ensaios climáticos, bem como a irradiância e a radiação incidente total de cada um dos ensaios.

Quadro 9.47 - Irradiância e radiação total incidente dos ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | Irradiância (340 nm)    | Radiação incidente total (340 nm) |
|------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| R68              | $0,68 \text{ W.m}^{-2}$ | $0,90 \text{ MJ.m}^{-2}$          |
| R87              | $0,87 \text{ W.m}^{-2}$ | $1,15 \text{ MJ.m}^{-2}$          |
| R103             | $1,03 \text{ W.m}^{-2}$ | $1,36 \text{ MJ.m}^{-2}$          |

Os ensaios climáticos R68, R87 e R103 foram realizados para os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 (o ensaio R68 corresponde ao ensaio E62 apresentado no ponto 9.3.1). Os geotêxteis foram expostos a cerca de 61 ciclos climáticos (do tipo C62) durante as 500 horas de ensaio.

#### 9.3.4.2 - Geotêxteis estabilizados com 0,2% de Chimassorb 944: B2-280 e B2-500

Os geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam sinais visíveis de degradação após o ensaio R68 (libertação de algumas fibras degradadas). Depois dos ensaios R87 e R103, os materiais estavam visivelmente mais danificados do que no fim do ensaio R68 (estavam mais frágeis, possuíam menor espessura e libertavam muitas fibras degradadas).

O Quadro 9.48 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e depois dos ensaios climáticos R68, R87 e R103. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual estão resumidos no Quadro 9.49. A Figura 9.45 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

Quadro 9.48 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 13,5 (12%)                                   | 78,4 (6,6%)                  | ---                      |
| R68              | 3,52 (28%)                                   | 34,1 (6,7%)                  | 26,1                     |
| R87              | 1,91 (28%)                                   | 32,1 (14%)                   | 14,1                     |
| R103             | 1,50 (22%)                                   | 32,2 (11%)                   | 11,1                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.49 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 5,9                                       | 6,7                                       | 7,0  | 8,1  | 478                            | ---                   |
| R68              | 6,0                                       | 8,3                                       | 10,1                                       | 10,9                                       | 62,6                           | 13,1                  |
| R87              | 2,2                                       | 3,4                                       | 5,1  | 5,8  | 30,7                           | 6,4                   |
| R103             | 2,4                                       | 3,4                                       | 4,3  | 4,8  | 22,8                           | 4,8                   |

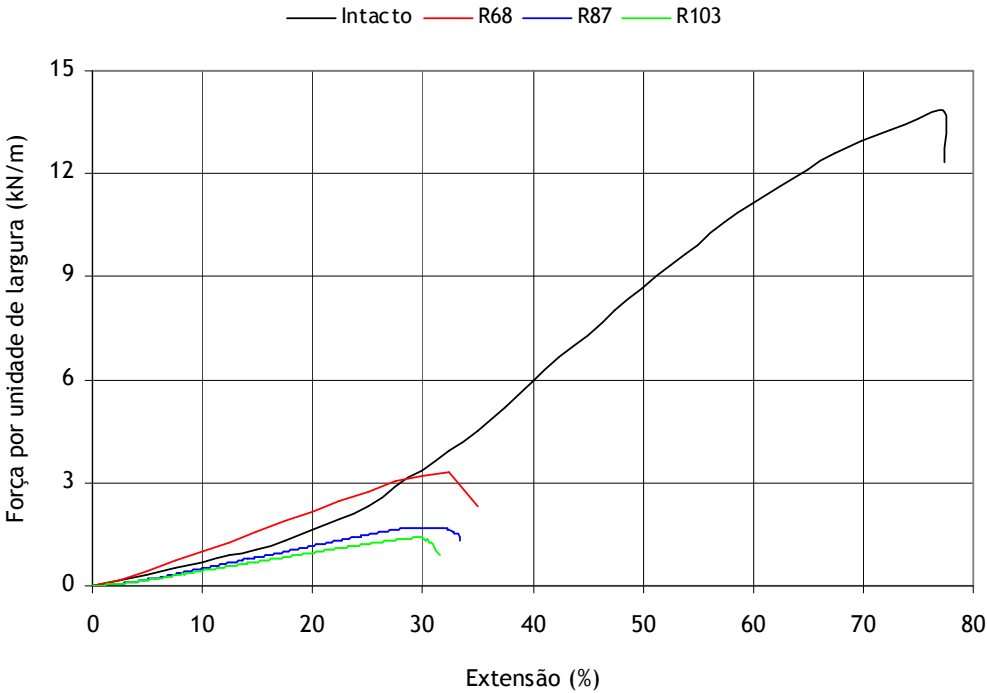


Figura 9.45 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

O Quadro 9.50 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e depois dos ensaios climáticos R68, R87 e R103. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se no Quadro 9.51. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos, estão ilustradas na Figura 9.46.

Quadro 9.50 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 26,6 (11%)                                  | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| R68              | 12,4 (21%)                                  | 30,9 (7,5%)                  | 46,6                     |
| R87              | 9,7 (17%)                                   | 29,3 (3,5%)                  | 36,5                     |
| R103             | 7,5 (24%)                                   | 26,4 (8,1%)                  | 28,2                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.51 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.

| Ensaio climatérico | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 32,5                                      | 35,1                                      | 35,9                                       | 40,0                                       | 1076                           | ---                   |
| R68                | 32,9                                      | 38,8                                      | 41,5                                       | 42,5                                       | 190                            | 17,7                  |
| R87                | 22,1                                      | 29,8                                      | 33,2                                       | 34,8                                       | 138                            | 12,8                  |
| R103               | 20,6                                      | 26,4                                      | 29,1                                       | 30,0                                       | 85,0                           | 7,9                   |

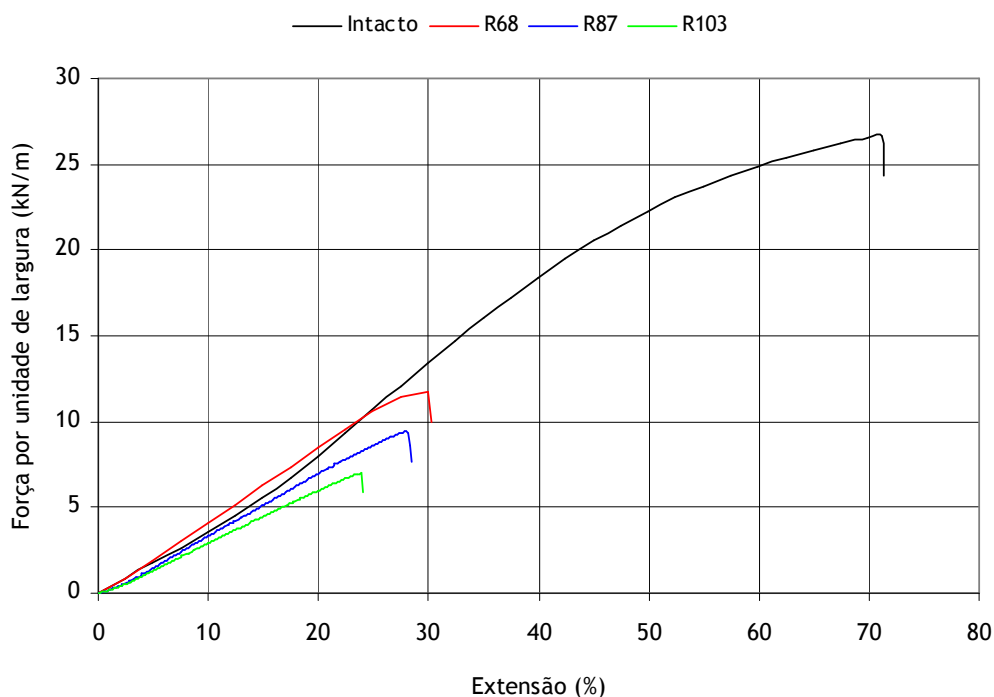


Figura 9.46 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.

A resistência à tracção dos geotêxteis com 0,2% de C944 diminuiu com o aumento da irradiância do passo de exposição à radiação UV. De facto, o geotêxtil B2-280 apresentava resistências residuais de 26,1%, 14,1% e 11,1% após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103, respectivamente. Do mesmo modo, o geotêxtil B2-500 possuía resistências residuais de 46,6% (no fim do ensaio R68), de 36,5% (depois do ensaio R87) e de 28,2% (no final do ensaio R103). De um modo geral, a extensão na força máxima e a robustez dos geotêxteis B2-280 e B2-500 também sofreram uma redução com o aumento da irradiância durante o passo de exposição à radiação UV. Deste modo, o aumento da irradiância (e da radiação incidente total) provocou um aumento da degradação sofrida pelos materiais durante os ensaios climatéricos.

#### 9.3.4.3 - Geotêxteis estabilizados com 0,4% de Chimassorb 944: B4-280 e B4-500

Os geotêxteis B4-280 e B4-500 não apresentavam sinais de degradação após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103. A inexistência de danos visíveis nos geotêxteis com 0,4% de C944 mostrou, desde logo, e tal como era esperado, que a presença de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos materiais contra a degradação causada pela radiação UV.

O Quadro 9.52 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se no Quadro 9.53. A Figura 9.47 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para o geotêxtil B4-280, antes e depois dos ensaios climáticos R68, R87 e R103.

Quadro 9.52 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto          | 13,3 (12%)                                   | 75,8 (8,0%)                  | ---                      |
| R68              | 6,68 (24%)                                   | 37,1 (11%)                   | <b>50,2</b>              |
| R87              | 5,69 (17%)                                   | 35,4 (9,1%)                  | <b>42,8</b>              |
| R103             | 5,31 (13%)                                   | 31,0 (4,1%)                  | <b>39,9</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.53 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

| Ensaio climático | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto          | 6,0   | 7,2   | 7,3  | 8,7  | 453                             | ---                   |
| R68              | 8,6   | 11,6  | 14,6   | 17,4   | 134                             | <b>29,6</b>           |
| R87              | 5,4   | 9,1   | 12,8   | 15,8   | 82,6                            | <b>18,2</b>           |
| R103             | 7,2   | 11,1  | 14,5   | 17,2   | 74,3                            | <b>16,4</b>           |

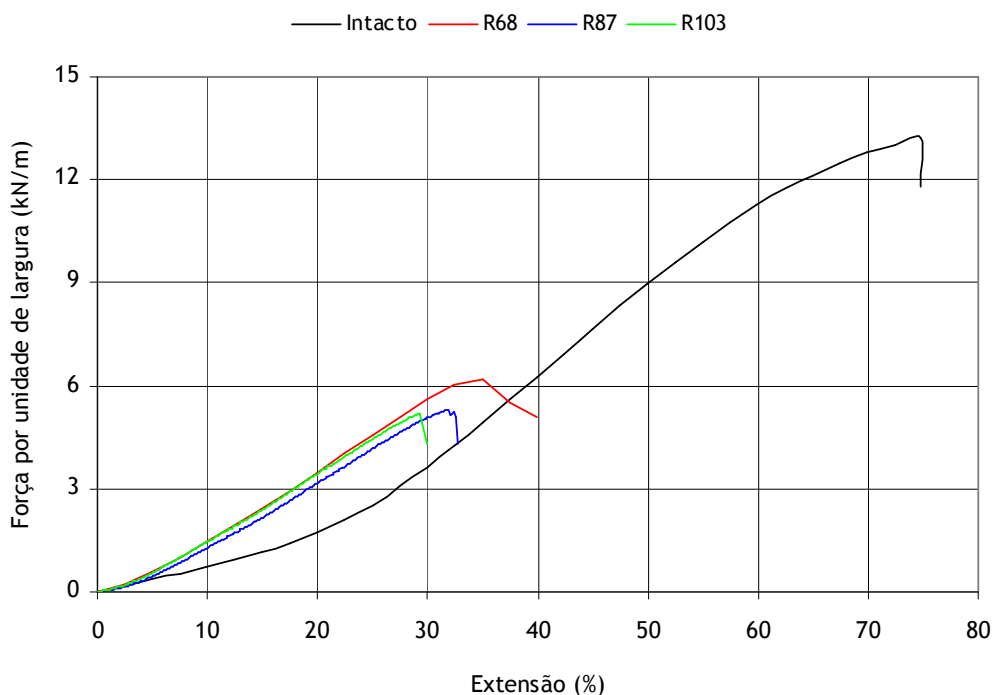


Figura 9.47 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

O Quadro 9.54 apresenta os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual podem ser encontrados no Quadro 9.55. As curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e depois dos ensaios climatéricos, estão representadas na Figura 9.48.

Quadro 9.54 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.

| Ensaio climatérico | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 27,6 (6,1%)                                  | 74,1 (10%)                   | ---                      |
| R68                | 19,3 (17%)                                   | 41,6 (7,2%)                  | <b>69,9</b>              |
| R87                | 15,8 (7,8%)                                  | 31,5 (3,7%)                  | <b>57,2</b>              |
| R103               | 13,8 (23%)                                   | 31,7 (15%)                   | <b>50,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.55 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.

| Ensaio climatérico | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 33,3  | 36,1  | 36,9   | 40,3   | 1188                            | ---                   |
| R68                | 36,6  | 43,0  | 46,3   | 49,0   | 369                             | <b>31,1</b>           |
| R87                | 39,7  | 49,5  | 53,2   | 54,4   | 258                             | <b>21,7</b>           |
| R103               | 34,0  | 41,8  | 45,3   | 46,8   | 196                             | <b>16,5</b>           |

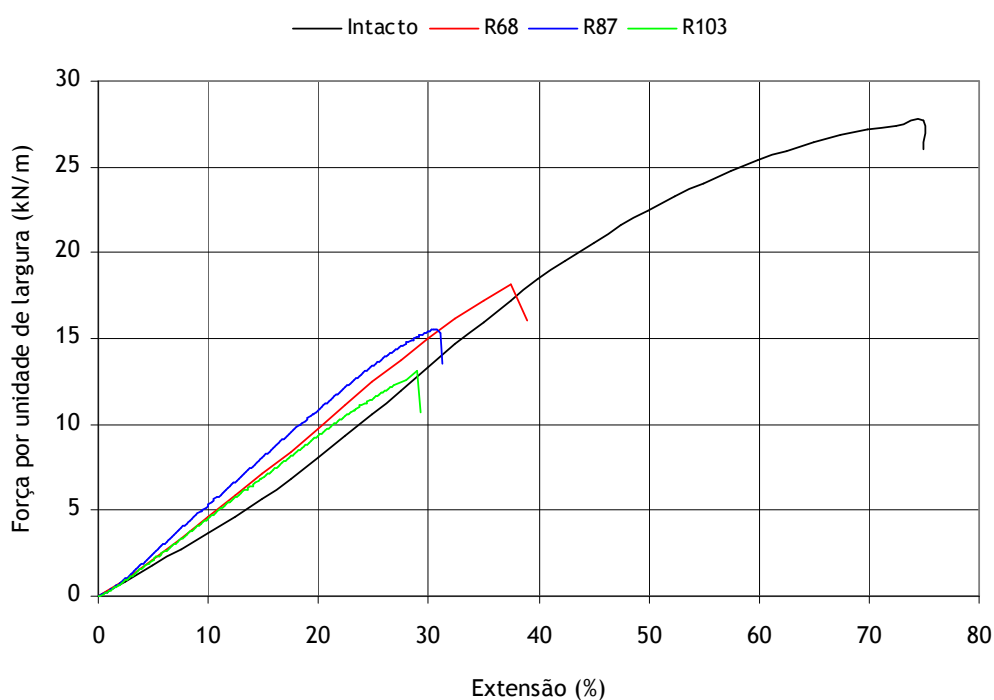


Figura 9.48 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os ensaios climatéricos R68, R87 e R103.

A resistência à tracção e a robustez dos geotêxteis com 0,4% de C944 diminuíram com o aumento da irradiância do passo de exposição à radiação UV. De um modo geral, os valores da extensão na força máxima também diminuíram com o aumento da irradiância. Assim, e tal como para os geotêxteis com 0,2% de C944, o aumento da irradiância (e o consequente aumento da radiação incidente total) também causou uma maior degradação aos geotêxteis com 0,4% de C944.

#### 9.3.4.4 - Comparação da resistência dos geotêxteis às diversas irradiâncias de exposição UV

A degradação ocorrida nos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 durante o passo de exposição à radiação UV dependeu da irradiância. A Figura 9.49 resume as resistências residuais dos materiais após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

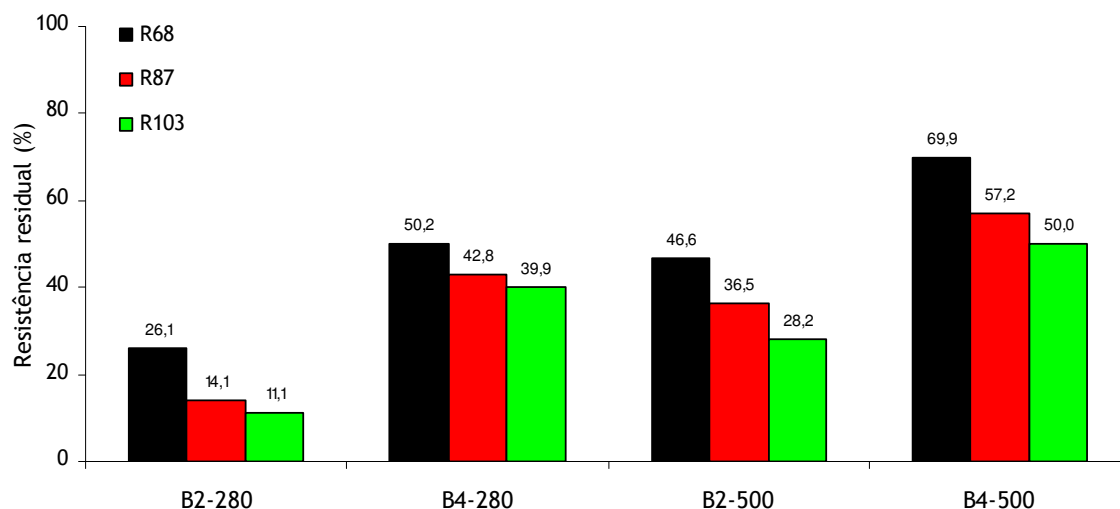


Figura 9.49 - Comparação das resistências residuais dos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 após os ensaios climáticos R68, R87 e R103.

A degradação sofrida pelos geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 aumentou com o aumento da irradiância do passo de exposição à radiação UV (aumento da degradação de R68 para R103). Assim, o processo de foto-degradação dos materiais pode ser acelerado pelo uso de irradiâncias elevadas (as lâmpadas UVA-340 possuem uma irradiância de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm em condições normais de operação). No entanto, a utilização de irradiâncias elevadas (superiores à irradiância da luz solar) prejudica a correlação espectral existente entre as lâmpadas UVA-340 e a radiação solar, podendo dificultar a obtenção de boas correlações entre a degradação dos materiais em laboratório e a sua degradação sob condições reais.

#### 9.3.5 - Ensaios climáticos segundo a norma NP EN 12224

##### 9.3.5.1 - Características particulares dos ensaios

A resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos foi também avaliada seguindo, de forma tão próxima quanto possível, a NP EN 12224:2007 (Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência ao envelhecimento devido ao clima). O método de ensaio descrito na norma NP EN 12224 pretende diferenciar os materiais que possuem pouca (ou nenhuma) resistência aos agentes climáticos dos materiais que possuem uma resistência relativamente elevada a estes agentes.



Os geotêxteis foram expostos durante 362 horas a um ciclo climatérico constituído por um passo de exposição à radiação UV (5 horas a 50 °C) e por um passo de chuva (Quadro 9.56). A norma NP EN 12224 especifica que o passo de chuva deve ter uma duração de 1 hora. No entanto, e contrariando as indicações da norma NP EN 12224, o passo de chuva teve uma duração de apenas 10 minutos. A alteração da duração do passo de chuva foi necessária devido ao facto do sistema de purificação da água (o passo de chuva necessita de água purificada para evitar o entupimento dos aspersores) não produzir água suficiente para uma pulverização contínua de 1 hora. Além disso, a utilização de um passo de chuva de 1 hora (com um fluxo de 5 L.min<sup>-1</sup>) originaria um consumo de água extremamente elevado (300 L de água de 5 em 5 horas, 1200 L de água por dia).

Quadro 9.56 - Ciclo climatérico usado nos ensaios segundo a norma NP EN 12224.

|  |
|--|
| Passo 1: Exposição à radiação UV (50 °C) (5 horas) |
| Passo 2: Chuva (choque térmico) (10 minutos)       |
| (retorno ao passo 1)                               |

A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de 0,68 W.m<sup>-2</sup> aos 340 nm. A radiação incidente total durante as 362 horas de ensaio foi de 50 MJ.m<sup>-2</sup> entre os 290 nm e os 400 nm (valor de radiação incidente total definido na norma NP EN 12224). Os materiais foram expostos a cerca de 70 ciclos climatéricos durante as 362 horas totais do ensaio (cada ciclo possui a duração de 5 horas e 10 minutos).

#### 9.3.5.2 - Principais resultados obtidos

Os geotêxteis B0-280 e B0-500 não resistiram ao ensaio climatérico realizado seguindo de perto a NP EN 12224 (os geotêxteis sofreram degradação completa e ficaram reduzidos a pequenos pedaços ou a pó). Os restantes geotêxteis (B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500) não apresentavam danos visíveis após o mesmo ensaio climatérico. A degradação total dos geotêxteis não estabilizados e a inexistência de danos visíveis nos geotêxteis com C944 mostrou, desde logo, a importância da adição de aditivos químicos aos geotêxteis de PP.

O Quadro 9.57 resume os valores da resistência residual e da robustez residual dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> após o ensaio climatérico realizado seguindo de perto a NP EN 12224. Do mesmo modo, o Quadro 9.58 resume os valores obtidos para os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup>.

Quadro 9.57 - Resistência residual e robustez residual dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> após o ensaio climatérico de acordo com a norma NP EN 12224.

| Geotêxtil | Resistência residual (%) | Robustez residual (%) |
|-----------|--------------------------|-----------------------|
| B0-280    | 0                        | 0                     |
| B2-280    | 47,8                     | 26,2                  |
| B4-280    | 77,0                     | 43,8                  |
| P2-280    | 116                      | 93,0                  |

Quadro 9.58 - Resistência residual e robustez residual dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> após o ensaio climático de acordo com a norma NP EN 12224.

| Geotêxtil | Resistência residual (%) | Robustez residual (%) |
|-----------|--------------------------|-----------------------|
| B0-500    | 0                        | 0                     |
| B2-500    | 74,3                     | 46,4                  |
| B4-500    | 91,4                     | 55,2                  |
| P2-500    | 104                      | 98,0                  |

A resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos simulados laboratorialmente variou de acordo com a composição química dos materiais. A degradação dos materiais foi significativamente retardada pela incorporação de C944 nas fibras de PP (os geotêxteis não estabilizados apresentaram uma resistência muito baixa ao envelhecimento climático). A degradação ocorrida nos geotêxteis com 0,4% de C944 foi inferior à degradação ocorrida nos geotêxteis com 0,2% de C944 (comparando materiais com massas por unidade de área semelhantes). A resistência dos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (B2-500 e B4-500) ao envelhecimento climático foi maior que a resistência dos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> (B2-280 e B4-280) (comparando materiais com a mesma composição). Os geotêxteis com negro de carbono (P2-280 e P2-500) apresentaram uma resistência muito elevada aos agentes climáticos simulados em laboratório. Assim, o ensaio climático realizado seguindo de perto a NP EN 12224 permitiu diferenciar, em termos de resistência ao envelhecimento climático, vários geotêxteis de PP com diferentes composições químicas.

### 9.3.6 - Efeito da imersão em líquidos na resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos

#### 9.3.6.1 - Características particulares dos ensaios

Neste ponto, procede-se à avaliação do efeito da imersão em várias soluções químicas na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos. Para tal, o geotêxtil B2-500 foi imerso, à temperatura ambiente e a temperatura elevada, em várias soluções químicas e, em seguida, exposto a um ensaio climático no QUV.

O geotêxtil B2-500 foi imerso, a temperatura elevada (90 °C), em água, ácido sulfúrico e hidróxido de sódio. As condições experimentais dos vários ensaios de imersão a 90 °C encontram-se resumidas no Quadro 9.59.

Quadro 9.59 - Ensaio de imersão a 90 °C do geotêxtil B2-500 antes da exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Ensaio de imersão  | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|--------------------|---|---------------------|
| Água               | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7)  | 90 °C, 14 dias      |
| Ácido sulfúrico    | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1) | 90 °C, 14 dias      |
| Hidróxido de sódio | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13)                          | 90 °C, 14 dias      |

O geotêxtil B2-500 foi também imerso, à temperatura ambiente, em água, ácido sulfúrico, ácido nítrico, hidróxido de sódio e em cloreto de sódio. As condições experimentais dos vários ensaios de imersão à temperatura ambiente encontram-se resumidas no Quadro 9.60.

Quadro 9.60 - Ensaio de imersão à temperatura ambiente do geotêxtil B2-500 antes da exposição aos agentes climatéricos no QUV.

| Ensaio de imersão  | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|--------------------|---|---------------------|
| Água               | H <sub>2</sub> O<br>(pH ≈ 7)  | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Ácido sulfúrico    | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 1) | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Ácido nítrico      | HNO <sub>3</sub> (0,01 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)              | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Hidróxido de sódio | NaOH (0,1 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 13)                          | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Cloreto de sódio   | NaCl (10 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 6,5)                            | ≈ 20 °C, 100 dias   |

As condições experimentais usadas na imersão em ácido nítrico (pH ≈ 2) devem-se ao facto de, no ponto seguinte (9.3.7), este ácido ter sido utilizado para acidular as soluções de cationes metálicos onde os materiais foram imersos (o pH das soluções de cationes metálicos foi ajustado para pH 2 pela adição de ácido nítrico). Assim, foi necessário avaliar qual o efeito (se algum) da imersão em ácido nítrico na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climatéricos.

Os ensaios de imersão a 90 °C foram efectuados num banho termostático (marca *GFL*, modelo 1003) (equipamento descrito no ponto 6.2.1), ao passo que os ensaios de imersão à temperatura ambiente foram realizados em bacias vulgares (a parte superior das bacias foi coberta com plástico negro para proteger os provetes imersos da acção da luz). As principais características dos reagentes utilizados na preparação das soluções de imersão encontram-se no Quadro 6.2 (Capítulo 6).

Os provetes imersos possuíam 400 mm de comprimento e 50 mm de largura (dimensões compatíveis com os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN 29073-3). Após as imersões, os provetes não foram lavados (de modo a ficarem contaminados com alguns restos das soluções de imersão) e foram secos, pelo menos durante 7 dias, em local seco e ao abrigo da luz.

Após os ensaios de imersão (e posterior secagem), os provetes do geotêxtil B2-500 foram expostos, durante 250 horas, ao ciclo climatérico C62 (6 horas de exposição à radiação UV a 60 °C, 10 minutos de chuva e 2 horas de condensação a 45 °C). A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de 0,68 W.m<sup>-2</sup> a 340 nm. A radiação incidente total durante as 250 horas de ensaio foi de 0,45 MJ.m<sup>-2</sup> a 340 nm e de 25,92 MJ.m<sup>-2</sup> entre os 290 nm e os 400 nm. Os provetes foram expostos a 30,6 ciclos climatéricos durante as 250 horas totais de ensaio.

**9.3.6.2 - Resistência do geotêxtil B2-500 à imersão em várias soluções químicas**

O geotêxtil B2-500 não apresentava sinais visíveis de degradação após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente e a 90 °C. Os valores obtidos para a resistência à tracção, para a extensão na força máxima e para a resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão à temperatura ambiente, estão resumidos no Quadro 9.61. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual são apresentados no Quadro 9.62. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão à temperatura ambiente, estão ilustradas na Figura 9.50.

Quadro 9.61 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão  | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 26,6 (11%)                                  | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Água               | 26,8 (6,7%)                                 | 70,3 (10%)                   | <b>101</b>               |
| Ácido sulfúrico    | 26,4 (9,8%)                                 | 69,1 (12%)                   | <b>99,2</b>              |
| Ácido nítrico      | 26,8 (9,4%)                                 | 71,7 (9,9%)                  | <b>101</b>               |
| Hidróxido de sódio | 26,6 (6,7%)                                 | 72,5 (6,2%)                  | <b>100</b>               |
| Cloreto de sódio   | 26,7 (7,4%)                                 | 75,4 (2,8%)                  | <b>100</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.62 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

| Ensaio de imersão  | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 32,5                                      | 35,1                                      | 35,9                                       | 40,0                                       | 1076                           | ---                   |
| Água               | 32,1                                      | 35,1                                      | 36,8                                       | 41,5                                       | 1063                           | <b>98,8</b>           |
| Ácido sulfúrico    | 36,2                                      | 38,3                                      | 37,8                                       | 40,9                                       | 1002                           | <b>93,1</b>           |
| Ácido nítrico      | 35,2                                      | 37,1                                      | 36,9                                       | 40,0                                       | 1043                           | <b>96,9</b>           |
| Hidróxido de sódio | 30,6                                      | 33,4                                      | 34,5                                       | 38,1                                       | 1083                           | <b>101</b>            |
| Cloreto de sódio   | 30,2                                      | 33,0                                      | 33,8                                       | 37,7                                       | 1117                           | <b>104</b>            |

A resistência à tracção e a robustez do geotêxtil B2-500 não sofreram grandes alterações durante os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente (resistência residual entre os 99,2% e os 101% e robustez residual entre os 93,1% e os 104%). Os valores da extensão na força máxima e da rigidez secante também não sofreram alterações muito significativas (os valores obtidos para os provetes imersos foram bastante idênticos aos valores de referência). De um modo geral, o geotêxtil B2-500 apresentou uma boa resistência aos vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

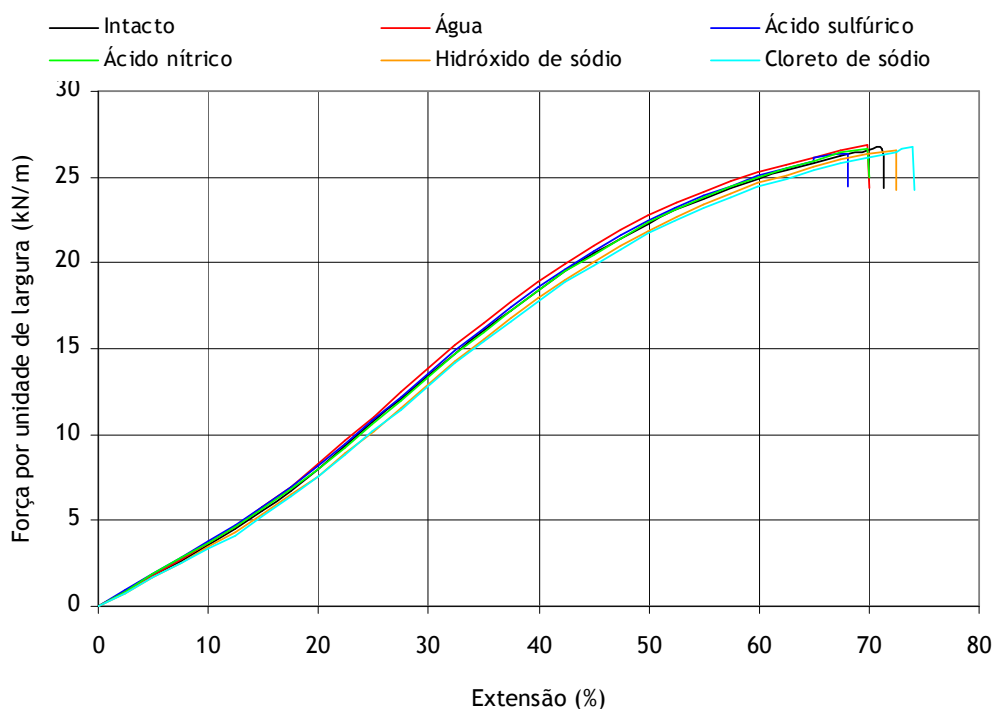


Figura 9.50 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão à temperatura ambiente.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão a 90 °C, podem ser encontradas nos Quadros 9.63 e 9.64. As respectivas curvas médias força-extensão encontram-se ilustradas na Figura 9.51.

Quadro 9.63 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão a 90 °C.

| Ensaio de imersão  | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Água               | 26,6 (6,6%)                                  | 67,8 (3,3%)                  | <b>100</b>               |
| Ácido sulfúrico    | 26,4 (11%)                                   | 70,6 (7,6%)                  | <b>99,2</b>              |
| Hidróxido de sódio | 27,2 (8,9%)                                  | 68,0 (9,7%)                  | <b>102</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.64 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão a 90 °C.

| Ensaio de imersão  | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 32,5  | 35,1  | 35,9   | 40,0   | 1076                            | ---                   |
| Água               | 31,7  | 36,4  | 37,4   | 40,6   | 944                             | <b>87,7</b>           |
| Ácido sulfúrico    | 29,3  | 34,4  | 36,2   | 40,8   | 1038                            | <b>96,5</b>           |
| Hidróxido de sódio | 33,4  | 38,6  | 39,7   | 43,1   | 963                             | <b>89,5</b>           |

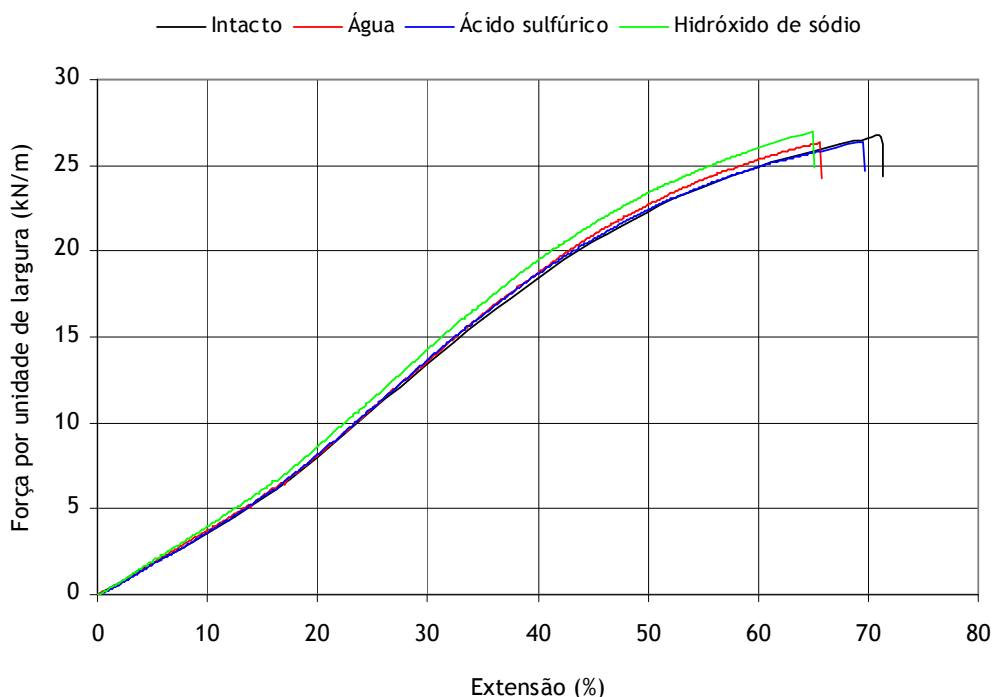


Figura 9.51 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão a 90°C.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-500 não sofreu grandes alterações após os vários ensaios de imersão a 90 °C (resistências residuais entre 99,2% e 102%). Os valores da extensão na força máxima também não apresentaram grandes alterações (apenas uma ligeira diminuição após as imersões em água e em hidróxido de sódio). A robustez do geotêxtil B2-500 sofreu uma pequena redução depois das imersões em água (robustez residual de 87,7%) e em hidróxido de sódio (robustez residual de 89,5%) (robustez residual de 96,5% após a imersão em ácido sulfúrico). Os valores da rigidez secante dos provetes imersos foram semelhantes aos valores de referência. De um modo geral, o geotêxtil B2-500 também apresentou uma boa resistência aos vários ensaios de imersão a 90 °C.

### 9.3.6.3 - Efeito dos ensaios de imersão à temperatura ambiente na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos

Após o ensaio climático, os provetes imersos nas várias soluções químicas à temperatura ambiente possuíam um aspecto idêntico ao dos provetes sem imersão (provetes sem nenhuns sinais visíveis de degradação). Assim, não foram encontrados indícios visuais da existência de algum efeito das várias imersões à temperatura ambiente na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos.

Os resultados obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV, estão resumidos no Quadro 9.65. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual são apresentados no Quadro 9.66. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV, estão ilustradas na Figura 9.52.

Quadro 9.65 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Sem imersão        | 17,8 (11%)                                   | 42,4 (7,3%)                  | <b>66,9</b>              |
| Água               | 17,8 (6,5%)                                  | 39,2 (8,1%)                  | <b>66,9</b>              |
| Ácido sulfúrico    | 17,8 (6,5%)                                  | 42,7 (5,5%)                  | <b>66,9</b>              |
| Ácido nítrico      | 17,9 (5,0%)                                  | 41,9 (5,9%)                  | <b>67,3</b>              |
| Hidróxido de sódio | 17,2 (11%)                                   | 41,5 (9,0%)                  | <b>64,7</b>              |
| Cloreto de sódio   | 17,7 (22%)                                   | 43,2 (4,7%)                  | <b>66,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.66 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500   | $J_{SEC} 2\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 5\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 10\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 20\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|------------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 32,5                                    | 35,1                                    | 35,9                                     | 40,0                                     | 1076                               | ---                      |
| Sem imersão        | 28,1                                    | 37,7                                    | 42,4                                     | 46,2                                     | 382                                | <b>35,5</b>              |
| Água               | 30,7                                    | 40,4                                    | 44,9                                     | 48,6                                     | 346                                | <b>32,2</b>              |
| Ácido sulfúrico    | 25,9                                    | 32,9                                    | 37,7                                     | 41,7                                     | 356                                | <b>33,1</b>              |
| Ácido nítrico      | 26,8                                    | 33,5                                    | 38,2                                     | 42,4                                     | 364                                | <b>33,8</b>              |
| Hidróxido de sódio | 27,9                                    | 36,3                                    | 40,8                                     | 44,6                                     | 355                                | <b>33,0</b>              |
| Cloreto de sódio   | 29,3                                    | 36,5                                    | 39,8                                     | 42,8                                     | 370                                | <b>34,4</b>              |

A resistência aos agentes climáticos dos provetes do geotêxtil B2-500 imersos em água, em ácido sulfúrico, em ácido nítrico, em hidróxido de sódio e em cloreto de sódio foi idêntica à resistência dos provetes não imersos (expostos directamente aos agentes climáticos). De facto, após o ensaio climático, os provetes imersos nas várias soluções químicas possuíam resistências residuais (entre os 64,7% e os 67,3%) muito semelhantes à resistência residual dos provetes não imersos (66,9%).

Após a exposição aos agentes climáticos no QUV, os valores obtidos da extensão na força máxima, da rigidez secante e da robustez dos provetes previamente imersos nas várias soluções químicas também foram idênticos aos valores dos provetes sem imersão. Assim, a imersão prévia nas várias soluções (durante 100 dias à temperatura ambiente) não provocou uma alteração da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos simulados no QUV.

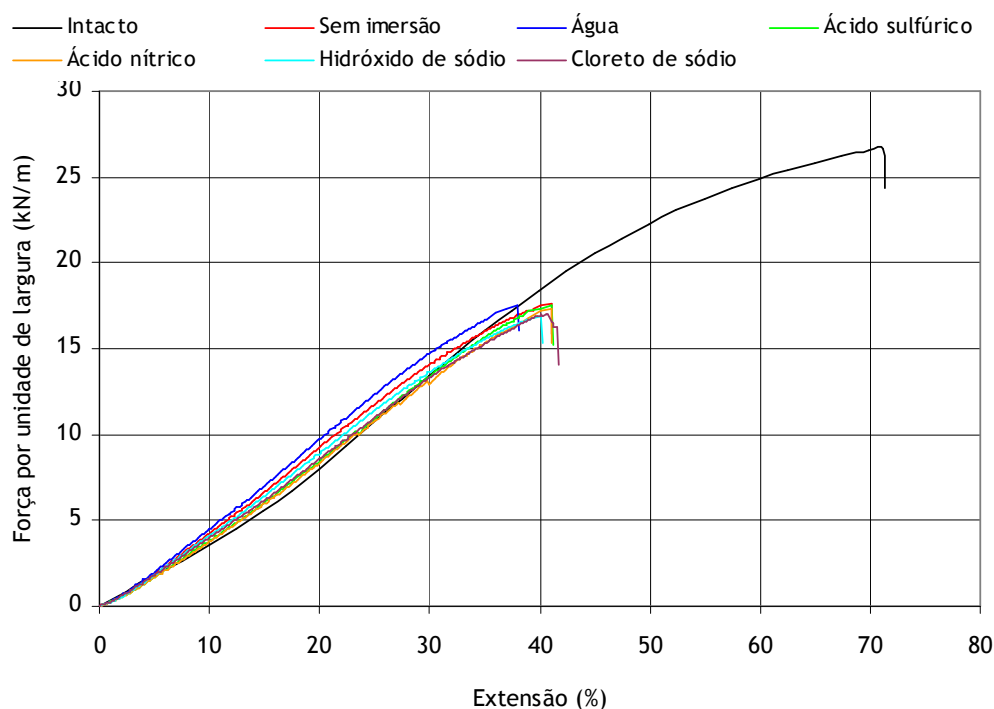


Figura 9.52 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão à temperatura ambiente e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

As imersões (à temperatura ambiente) em água, em ácido sulfúrico, em ácido nítrico, em hidróxido de sódio e em cloreto de sódio não provocaram a diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos simulados em laboratório. Assim, a extração e/ou o consumo de C944 durante as imersões, a existir, é pouco significativo (a diminuição do teor de C944 certamente causaria uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos). Além disso, os resíduos dos agentes de imersão existentes nos provetes não catalisaram o processo de degradação do geotêxtil B2-500 durante a exposição aos agentes climáticos.

#### 9.3.6.4 - Efeito dos ensaios de imersão a 90°C na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos

Ao contrário dos provetes do geotêxtil B2-500 sem imersão, os provetes imersos, a 90°C, em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio apresentavam alguns sinais visíveis de degradação após o ensaio climático no QUV. De facto, a passagem das mãos pela superfície dos provetes originava a libertação (em pequena quantidade) de algumas fibras degradadas. Além disso, os provetes imersos em ácido sulfúrico (cor branca após o ensaio de imersão) adquiriram uma cor amarela/acastanhada após a exposição aos agentes climáticos (Figura 9.53). A cor dos provetes imersos em hidróxido de sódio e em água (cor branca após os ensaios de imersão) não sofreu alterações significativas durante o ensaio climático.

Assim, foram, desde logo, encontrados indícios da existência de algum efeito das imersões (a 90 °C) em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos simulados no QUV.





Figura 9.53 - Aspecto dos provetes do geotêxtil B2-500 imersos em ácido sulfúrico, a 90 °C, após a exposição aos agentes climáticos no QUV.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-500, determinadas antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos, encontram-se resumidas nos Quadros 9.67 e 9.68. As respectivas curvas médias força-extensão estão na Figura 9.54.

Quadro 9.67 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|--------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto            | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Sem imersão        | 17,8 (11%)                                   | 42,4 (7,3%)                  | <b>66,9</b>              |
| Água               | 12,2 (12%)                                   | 28,1 (7,7%)                  | <b>45,9</b>              |
| Ácido sulfúrico    | 14,3 (17%)                                   | 32,0 (14%)                   | <b>53,8</b>              |
| Hidróxido de sódio | 12,1 (11%)                                   | 31,5 (7,0%)                  | <b>45,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.68 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500   | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|--------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto            | 32,5  | 35,1  | 35,9   | 40,0   | 1076                            | ---                   |
| Sem imersão        | 28,1  | 37,7  | 42,4   | 46,2   | 382                             | <b>35,5</b>           |
| Água               | 30,2  | 40,3  | 44,9   | 46,5   | 159                             | <b>14,8</b>           |
| Ácido sulfúrico    | 29,4  | 37,4  | 41,7   | 44,9   | 214                             | <b>19,9</b>           |
| Hidróxido de sódio | 24,4  | 33,0  | 37,8   | 40,2   | 178                             | <b>16,5</b>           |

Após a exposição aos agentes climáticos no QUV, a resistência à tracção dos provetes do geotêxtil B2-500 previamente imersos (a 90 °C) em água, ácido sulfúrico e hidróxido de sódio foi menor que a resistência à tracção dos provetes não imersos. De facto, os provetes imersos possuíam resistências à tracção semelhantes entre si (resistências residuais entre os 45,5% e os 53,8%), mas menores que a resistência à tracção dos provetes não imersos (resistência residual de 66,9%).

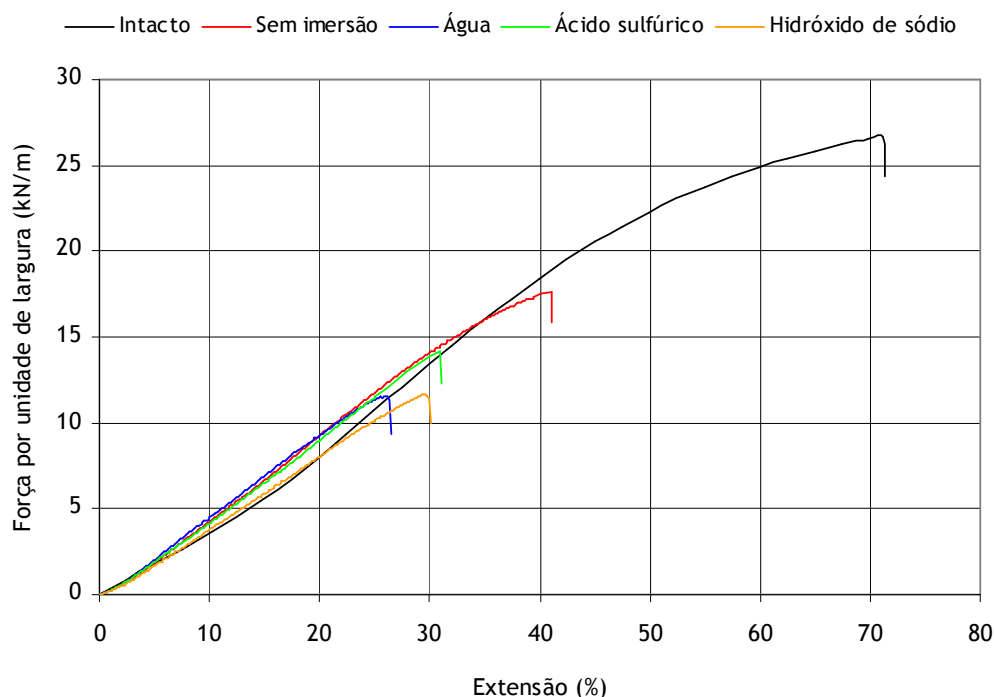


Figura 9.54 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão a 90 °C e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

Após o ensaio climático no QUV, os valores obtidos para a extensão na força máxima dos provetes previamente imersos em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio eram idênticos entre si (entre os 28,1% e os 32,0%), mas inferiores ao valor obtido para os provetes sem imersão (42,4%). Do mesmo modo, no fim do ensaio climático, a robustez dos provetes sem imersão (robustez residual de 35,5%) era maior que a robustez dos provetes previamente imersos em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio (robustez residual entre os 14,8% e os 19,9%).

A resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos diminuiu pela imersão prévia do material, a 90 °C, em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio (a resistência aos agentes climáticos após a imersão em ácido sulfúrico foi ligeiramente superior à resistência após a imersão em água e em hidróxido de sódio). Assim, os danos causados pela exposição sucessiva do geotêxtil B2-500 aos dois agentes de degradação (imersão em líquidos e exposição a agentes climáticos) foram maiores que a soma dos danos provocados por cada um dos agentes isolados (a imersão em líquidos a 90 °C, só por si, não originou danos mecânicos imediatos no geotêxtil B2-500).

A diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos após os ensaios de imersão a 90 °C poderá ter ocorrido por duas razões: (1) os ensaios de imersão causaram a extracção e/ou o consumo do C944 existente no geotêxtil B2-500, desprotegendo-o contra a acção futura dos agentes climáticos ou (2) os restos das soluções de imersão funcionaram como catalisadores do processo de degradação causado pelos agentes climáticos. No entanto, e dado que a redução da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos foi semelhante após as imersões em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio, a segunda hipótese é improvável (os restos de água não actuaram certamente como catalisadores do processo de degradação causado pelos agentes climáticos).

Além disso, os ensaios de imersão à temperatura ambiente em ácido sulfúrico e hidróxido de sódio não provocaram uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos. Assim, e admitindo que as contaminações com ácido sulfúrico e hidróxido de sódio seriam idênticas a 90 °C e à temperatura ambiente (as soluções de imersão eram iguais), seria de esperar, que caso houvesse algum efeito catalítico por parte dos restos de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio, este também tivesse ocorrido para os provetes previamente imersos à temperatura ambiente.

Deste modo, a diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos ocorreu muito provavelmente devido à perda e/ou consumo de C944 durante os ensaios de imersão a 90 °C, o que desprotegeu o material contra a acção futura dos agentes climáticos. Assim, apesar dos ensaios de imersão a 90 °C não provocarem, só por si, danos mecânicos nos materiais, podem comprometer seriamente a sua resistência contra a acção de agentes de degradação futuros.

### 9.3.7 - Efeito dos catiões metálicos na resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos

#### 9.3.7.1 - Características particulares dos ensaios

Neste ponto, procede-se à avaliação do efeito dos catiões metálicos (cádmio, cobre, ferro e zinco) na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos. Para tal, o geotêxtil B2-500 foi imerso, à temperatura ambiente, em soluções de catiões metálicos (sais de nitrato) e, em seguida, exposto a um ensaio climático no QUV. As condições experimentais dos ensaios de imersão encontram-se resumidas no Quadro 9.69.

Quadro 9.69 - Ensaio de imersão em soluções de catiões metálicos antes da exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Ensaio de imersão        | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|--------------------------|---|---------------------|
| Nitrato de cádmio (II) * | $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)** | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de cobre (II) *  | $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)** | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de ferro (III) * | $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)** | ≈ 20 °C, 100 dias   |
| Nitrato de zinco (II) *  | $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (5 g.L <sup>-1</sup> )<br>(pH ≈ 2)** | ≈ 20 °C, 100 dias   |

(\*os estados de oxidação dos catiões metálicos serão omitidos no texto)

(\*\*pH ajustado para pH 2 pela adição de ácido nítrico)

(reagentes da marca Merck, qualidade: *pro analysis*)

As soluções dos catiões metálicos foram aciduladas para pH 2 pela adição de ácido nítrico. O efeito da imersão em ácido nítrico (imersão durante 100 dias à temperatura ambiente, pH 2) na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos foi avaliado no ponto 9.3.6 (a imersão em ácido nítrico não provocou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos). Assim, e dado o efeito nulo da imersão em ácido nítrico, as alterações que possam ocorrer na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos serão apenas atribuíveis aos catiões metálicos.

Os provetes imersos possuíam 400 mm de comprimento e 50 mm de largura (dimensões compatíveis com os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN 29073-3). Os ensaios de imersão foram realizados em bacias vulgares (a parte superior das bacias foi coberta com plástico preto para proteger os materiais da acção da luz).

Após as imersões, os provetes não foram lavados (de modo a ficarem contaminados com restos das soluções dos catiões metálicos) e foram secos ao abrigo da luz, pelo menos, durante 7 dias. Em seguida, os provetes foram expostos durante 250 horas ao ciclo climático C62. A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  a 340 nm (radiação incidente total de  $0,45 \text{ MJ.m}^{-2}$  a 340 nm e de  $25,92 \text{ MJ.m}^{-2}$  entre os 290 nm e os 400 nm). O ensaio climático usado neste ponto foi igual ao ensaio climático usado no ponto 9.3.6.

### 9.3.7.2 - Resistência do geotêxtil B2-500 à imersão em soluções de catiões metálicos

O geotêxtil B2-500 não possuía sinais visíveis de degradação após os ensaios de imersão nas soluções dos catiões metálicos. No entanto, os provetes imersos em nitrato de ferro (originalmente brancos) ficaram com uma cor amarela e/ou laranja (cor idêntica à cor da solução de imersão), o que indicou a existência de uma contaminação dos provetes com nitrato de ferro. A cor dos provetes imersos em nitrato de cádmio, nitrato de cobre e nitrato de zinco não sofreu grandes alterações depois dos ensaios de imersão. As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-500, antes e após os vários ensaios de imersão nas soluções dos catiões metálicos, estão resumidas nos Quadros 9.70 e 9.71. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os ensaios de imersão, encontram-se na Figura 9.55.

Quadro 9.70 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de catiões metálicos.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,6 (11%)                                   | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Nitrato de cádmio | 26,6 (13%)                                   | 69,0 (9,4%)                  | 100                      |
| Nitrato de cobre  | 27,1 (9,4%)                                  | 72,4 (6,1%)                  | 102                      |
| Nitrato de ferro  | 26,7 (9,6%)                                  | 77,0 (4,4%)                  | 100                      |
| Nitrato de zinco  | 26,3 (9,4%)                                  | 73,4 (6,5%)                  | 98,9                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.71 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de catiões metálicos.

| Ensaio de imersão | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 32,5  | 35,1  | 35,9   | 40,0   | 1076                            | ---                   |
| Nitrato de cádmio | 35,0  | 37,5  | 37,2   | 40,2   | 1001                            | 93,0                  |
| Nitrato de cobre  | 26,9  | 31,1  | 34,2   | 38,5   | 1097                            | 102                   |
| Nitrato de ferro  | 29,6  | 32,1  | 33,3   | 37,4   | 1164                            | 108                   |
| Nitrato de zinco  | 32,4  | 34,3  | 34,9   | 38,5   | 1066                            | 99,1                  |

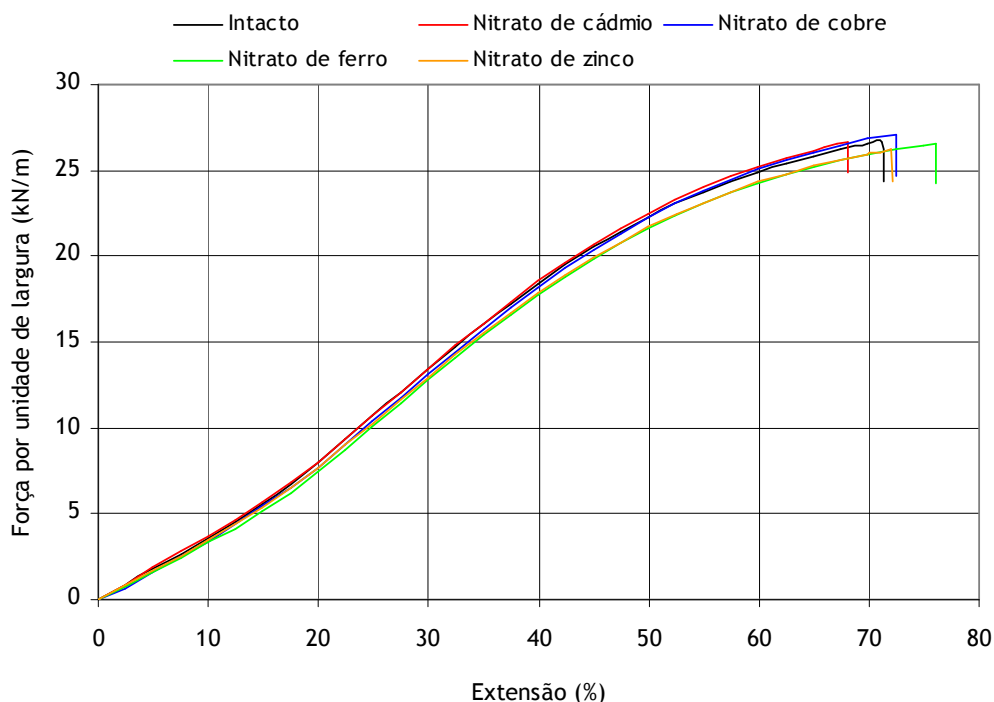


Figura 9.55 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios de imersão nas soluções de cátions metálicos.

A resistência à tracção do geotêxtil B2-500 não sofreu alterações muito significativas após os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos (resistências residuais entre 98,9% e 102%). Do mesmo modo, a robustez do geotêxtil B2-500 também não apresentou grandes alterações depois dos ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos (robustez residual entre 93,0% e 108%).

Os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos também não causaram alterações muito significativas na extensão na força máxima e na rigidez secante do geotêxtil B2-500 (os resultados obtidos para os provetes expostos foram muito idênticos aos resultados obtidos para os provetes de referência). De um modo geral, o geotêxtil B2-500 apresentou uma boa resistência à imersão nas várias soluções dos cátions metálicos.

A imersão do geotêxtil B2-500 nas soluções dos cátions metálicos poderá, por hipótese, ter causado uma perda de C944 (e, assim, ter desprotegido o material contra a subsequente acção dos agentes climatéricos). No entanto, é muito improvável que tenha ocorrido uma perda muito elevada de C944 durante os ensaios de imersão (não existem indícios que a imersão em ácido nítrico tenha originado uma perda de C944 e não existe nenhuma razão para pressupor que a presença adicional dos cátions metálicos possa provocar uma perda do aditivo).

Assim, considerando que os ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos não provocaram uma grande perda de C944 (se provocaram alguma) e tendo em conta que, nas condições utilizadas, os restos de ácido nítrico não aceleram a degradação provocada pelos agentes climatéricos, então, qualquer diminuição que possa ocorrer na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climatéricos será sobretudo devida à acção catalisadora dos cátions metálicos.

### 9.3.7.3 - Efeito dos ensaios de imersão nas soluções dos cátions metálicos na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos

Os provetes do geotêxtil B2-500 imersos em nitrato de cádmio e nitrato de zinco possuíam alguns sinais visíveis de degradação (libertação de algumas fibras degradadas) após o ensaio climático no QUV (o que, desde logo, indicou a existência de algum efeito dos cátions metálicos na resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos). Os provetes imersos em nitrato de cobre e em nitrato de ferro não apresentavam danos visíveis no final do ensaio climático no QUV.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-500, determinadas antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções de cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos, estão resumidas nos Quadros 9.72 e 9.73. As respectivas curvas médias força-extensão podem ser encontradas na Figura 9.56.

Quadro 9.72 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500  | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 26,6 (11%)                                  | 71,6 (9,7%)                  | ---                      |
| Sem imersão       | 17,8 (11%)                                  | 42,4 (7,3%)                  | <b>66,9</b>              |
| Nitrato de cádmio | 9,47 (13%)                                  | 27,8 (9,8%)                  | <b>35,6</b>              |
| Nitrato de cobre  | 13,5 (12%)                                  | 36,7 (7,8%)                  | <b>50,8</b>              |
| Nitrato de ferro  | 18,9 (5,2%)                                 | 44,3 (7,3%)                  | <b>71,1</b>              |
| Nitrato de zinco  | 6,45 (24%)                                  | 22,4 (4,5%)                  | <b>24,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 9.73 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Geotêxtil B2-500  | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 32,5                                      | 35,1                                      | 35,9                                       | 40,0                                       | 1076                           | ---                   |
| Sem imersão       | 28,1                                      | 37,7                                      | 42,4                                       | 46,2                                       | 382                            | <b>35,5</b>           |
| Nitrato de cádmio | 35,9                                      | 35,9                                      | 36,2                                       | 36,2                                       | 124                            | <b>11,5</b>           |
| Nitrato de cobre  | 28,8                                      | 35,8                                      | 38,3                                       | 39,9                                       | 236                            | <b>21,9</b>           |
| Nitrato de ferro  | 33,4                                      | 38,4                                      | 41,7                                       | 45,0                                       | 399                            | <b>37,1</b>           |
| Nitrato de zinco  | 40,0                                      | 36,3                                      | 33,8                                       | 30,2                                       | 81,8                           | <b>7,6</b>            |

Após a exposição aos agentes climáticos no QUV, a resistência residual dos provetes do geotêxtil B2-500 imersos em nitrato de cádmio (35,6%), nitrato de cobre (50,8%) e nitrato de zinco (24,2%) foi menor que a resistência residual dos provetes sem imersão (66,9%); os provetes imersos em nitrato de ferro possuíam uma resistência residual (71,1%) idêntica à resistência residual dos provetes sem imersão.

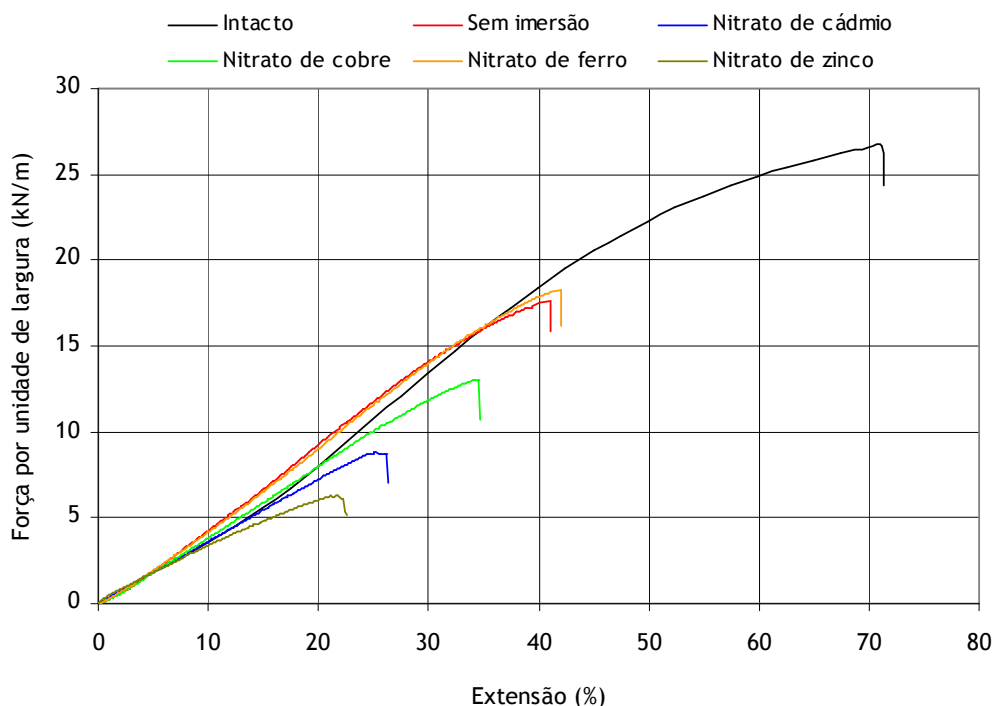


Figura 9.56 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os ensaios sucessivos de imersão nas soluções dos cátions metálicos e de exposição aos agentes climáticos no QUV.

No fim do ensaio climático no QUV, os valores da extensão na força máxima eram menores para os provetes imersos em nitrato de cádmio (27,8%), nitrato de cobre (36,7%) e nitrato de zinco (22,4%) do que para os provetes sem imersão (42,4%); a extensão na força máxima dos provetes imersos em nitrato de ferro (44,3%) era idêntica à extensão na força máxima dos provetes sem imersão.

Do mesmo modo, após o ensaio climático, a robustez residual dos provetes sem imersão (35,5%) também era maior que a robustez dos provetes imersos em nitrato de cádmio (11,5%), em nitrato de cobre (21,9%) e em nitrato de zinco (7,6%); a robustez residual dos provetes imersos em nitrato de ferro (37,1%) era semelhante à robustez residual dos provetes sem imersão.

A resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos diminuiu pela imersão prévia do material em nitrato de cádmio, nitrato de cobre e nitrato de zinco (a imersão na solução de nitrato de ferro não provocou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos). Assim, o processo de degradação do geotêxtil B2-500 durante o ensaio climático no QUV foi acelerado pela presença de restos de nitrato de cádmio, nitrato de cobre e nitrato de zinco.

A diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos (principalmente à radiação UV) poderá ser explicada pela acção catalisadora dos cátions metálicos no processo de degradação causado pela exposição à radiação UV (foto-degradação). A diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos poderá também ser explicada pela ocorrência de uma grande perda de C944 durante os ensaios de imersão nas soluções de cátions metálicos (o que, e tal como referido anteriormente, é considerado como improvável).

Os catiões metálicos podem catalisar o processo de foto-degradação dos geotêxteis e, assim, causar uma diminuição da sua durabilidade. A aceleração do processo de foto-degradação foi maior para os provetes contaminados com zinco, seguindo-se os provetes contaminados com cádmio e, por último, os provetes contaminados com cobre (a contaminação com cobre provocou uma diminuição drástica da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação - Capítulo 7). A contaminação com ferro (facilmente visível pela alteração da cor dos provetes imersos) não teve nenhum efeito catalisador no processo de foto-degradação dos geotêxteis (ao contrário do que aconteceu no processo de termo-oxidação).

### 9.3.8 - Avaliação da foto-degradação dos geotêxteis por FTIR

#### 9.3.8.1 - Características particulares dos ensaios

Os geotêxteis B2-500 e B4-500 foram expostos ao mesmo ciclo climático (designado por ciclo C44 no ponto 9.3.1; Quadro 9.20) durante diferentes intervalos de tempo (500, 1000, 1500 e 2000 horas) (os ensaios de 500, 1000 e 2000 horas correspondem aos ensaios descritos no ponto 9.3.2). O Quadro 9.74 resume, para as diferentes durações de ensaio, o número de ciclos C44 e os valores da radiação incidente total a que os geotêxteis B2-500 e B4-500 foram expostos; a irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm. Após a exposição aos agentes climáticos no QUV, o grau de foto-degradação das fibras dos geotêxteis foi avaliado por FTIR.

Quadro 9.74 - Número de ciclos C44 e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos.

| Tempo      | Número de ciclos C44 | Radiação incidente total (340 nm) | Radiação incidente total (290-400 nm) |
|------------|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 500 Horas  | 61,2                 | $0,60 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $34,56 \text{ MJ.m}^{-2}$             |
| 1000 Horas | 122,4                | $1,20 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $69,12 \text{ MJ.m}^{-2}$             |
| 1500 Horas | 183,7                | $1,80 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $103,68 \text{ MJ.m}^{-2}$            |
| 2000 Horas | 244,9                | $2,40 \text{ MJ.m}^{-2}$          | $138,24 \text{ MJ.m}^{-2}$            |

#### 9.3.8.2 - Principais resultados obtidos

A exposição aos agentes climáticos causou alterações nos espectros de FTIR dos geotêxteis B2-500 e B4-500; a alteração mais importante foi o aparecimento de uma nova banda centrada a  $1720 \text{ cm}^{-1}$ . A Figura 9.57 ilustra os espectros de FTIR obtidos para as fibras do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.

A banda centrada a  $1720 \text{ cm}^{-1}$  (inexistente nos espectros de FTIR das fibras intactas) é um indicador da presença de compostos carbonilo ( $\text{C=O}$ ); a formação deste tipo de compostos indica a ocorrência de oxidação em materiais de PP. Assim, a altura (absorvância) da banda centrada a  $1720 \text{ cm}^{-1}$  foi usada para avaliar o grau de foto-degradação dos geotêxteis B2-500 e B4-500. A Figura 9.58 ilustra a evolução da absorvância a  $1720 \text{ cm}^{-1}$  à medida que aumenta o tempo de exposição dos geotêxteis B2-500 e B4-500 aos agentes climáticos simulados no QUV.



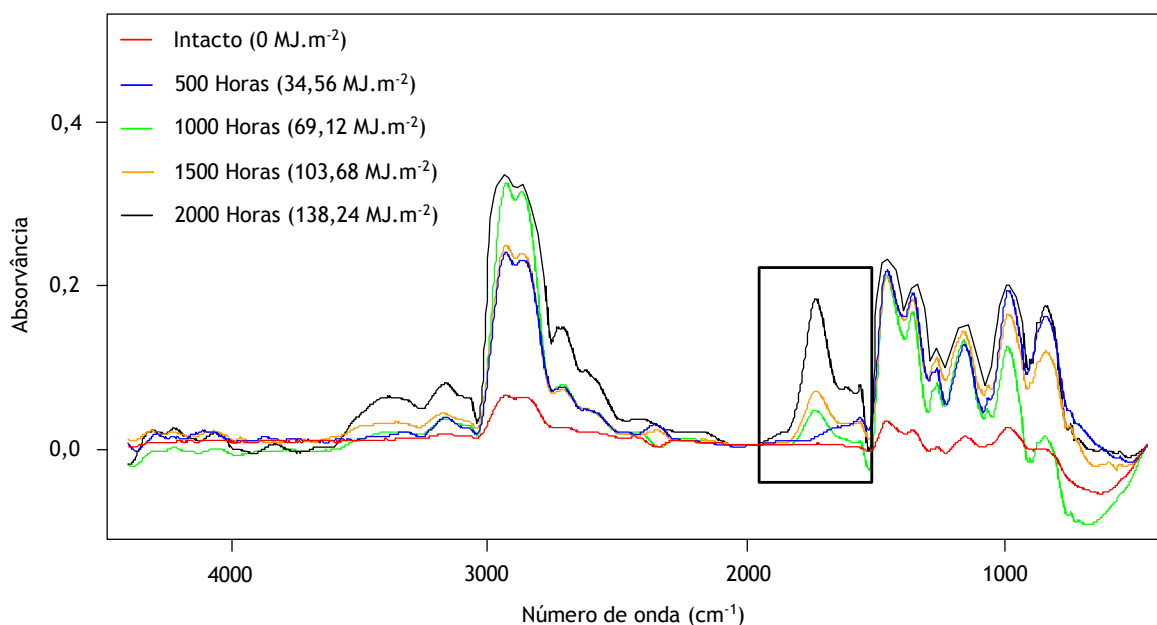


Figura 9.57 - Espectros de FTIR obtidos para as fibras do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.

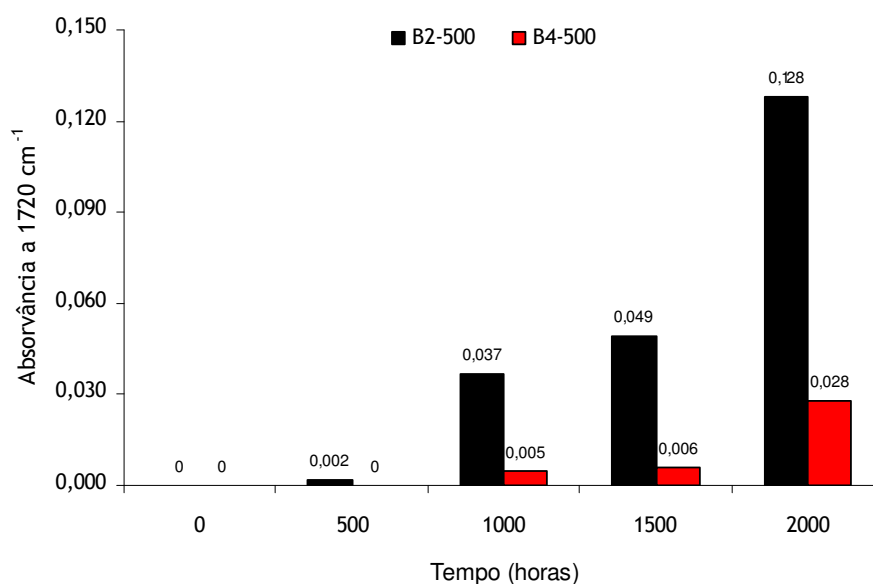


Figura 9.58 - Absorvância a  $1720\text{ cm}^{-1}$  das fibras dos geotêxteis B2-500 e B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.

Após 500 horas de exposição no QUV (radiação UV incidente total de  $34,56\text{ MJ.m}^{-2}$ ), a intensidade da banda centrada a  $1720\text{ cm}^{-1}$  era muito pequena (absorvância de 0,002 para o geotêxtil B2-500 e não detectada para o geotêxtil B4-500), indicando a existência de uma baixa quantidade de compostos carbonílicos. O aumento do tempo de exposição (aumento da radiação UV incidente total) provocou o aumento da intensidade da banda centrada a  $1720\text{ cm}^{-1}$ . De facto, após 1000 ( $69,12\text{ MJ.m}^{-2}$ ) e 2000 horas ( $138,24\text{ MJ.m}^{-2}$ ) de exposição, as fibras do geotêxtil B2-500 possuíam absorvâncias a  $1720\text{ cm}^{-1}$  de 0,037 e de 0,128, respectivamente; após 2000 horas de exposição, as fibras do geotêxtil B4-500 possuíam uma absorvância cerca de 4,6 vezes inferior (0,028 a  $1720\text{ cm}^{-1}$ ) à absorvância das fibras do geotêxtil B2-500.

A intensidade da banda centrada a  $1720\text{ cm}^{-1}$  foi sempre maior para as fibras do geotêxtil B2-500 do que para as fibras do geotêxtil B4-500 (comparando períodos de exposição idênticos), o que indica a ocorrência de maior foto-degradação (maior quantidade de compostos carbonílicos) nas fibras com menor quantidade de C944. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 resultou numa maior protecção das fibras de PP contra a foto-degradação (o que está de acordo com os resultados mecânicos apresentados no ponto 9.3.2).

A espectroscopia de infravermelho pode ser uma ferramenta extremamente útil para avaliar o grau de foto-degradação dos geotêxteis de PP. De facto, a Figura 9.59 ilustra a existência de uma relação entre a absorvância a  $1720\text{ cm}^{-1}$  e a resistência residual ou robustez residual dos geotêxteis de PP: a resistência à tracção e a robustez dos geotêxteis diminuem à medida que a absorvância a  $1720\text{ cm}^{-1}$  aumenta. Deste modo, a degradação mecânica ocorrida nos geotêxteis de PP (durante a exposição no QUV) também poderá ser prevista a partir de resultados químicos.

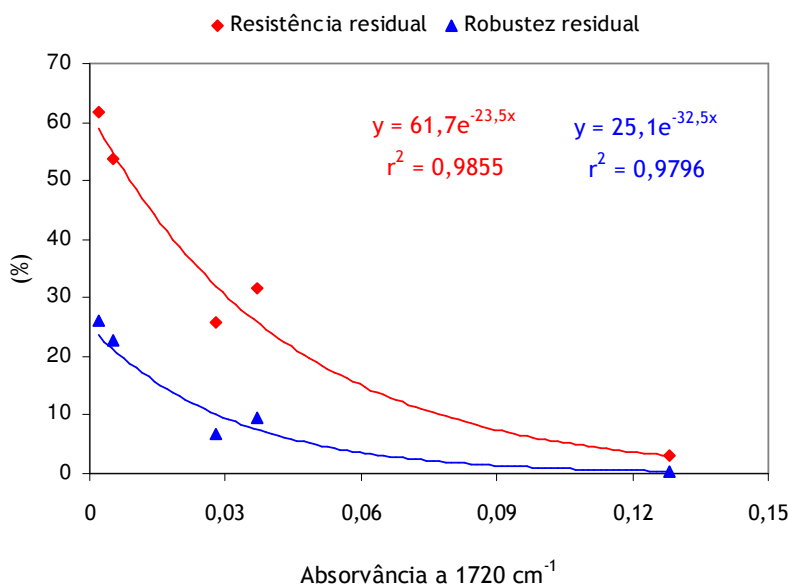


Figura 9.59 - Relação existente entre a absorvância a  $1720\text{ cm}^{-1}$  e a resistência residual ou robustez residual dos geotêxteis de PP.

### 9.3.9 - Determinação do teor de C944 nos geotêxteis expostos aos agentes climáticos

O teor de C944 foi determinado por HPLC-UV para as amostras do geotêxtil B4-500 expostas ao ciclo climático C44 (Quadro 9.20) durante 500, 1000, 1500 e 2000 horas (os ensaios de 500, 1000 e 2000 horas correspondem aos ensaios descritos no ponto 9.3.2) (Quadro 9.74); o C944 foi quantificado nas mesmas amostras do geotêxtil B4-500 analisadas por FTIR no ponto 9.3.8.

Após 500 horas de exposição (radiação UV incidente total de  $34,56\text{ MJ.m}^{-2}$ ), o teor de C944 existente no geotêxtil B4-500 era de 0,108% (cerca de 25% do teor inicial). O aumento do tempo de exposição (aumento da radiação UV incidente total) provocou uma diminuição do teor de C944. De facto, após 1000 horas ( $69,12\text{ MJ.m}^{-2}$ ) de exposição, a quantidade de C944 existente no geotêxtil B4-500 era de

apenas 0,020% (cerca de 5% do teor inicial). Após 1500 (103,68 MJ.m<sup>-2</sup>) e 2000 horas (138,24 MJ.m<sup>-2</sup>) de exposição, a presença de C944 não foi detectada no geotêxtil B4-500.

A exposição do geotêxtil B4-500 aos agentes climáticos no QUV provocou uma diminuição do teor de C944 (o aditivo foi consumido e/ou transformado noutros compostos durante o desempenho das suas funções protectoras). A Figura 9.60 compara a evolução da quantidade de C944 com a evolução da absorvância a 1720 cm<sup>-1</sup> durante a exposição do geotêxtil B4-500 no QUV.

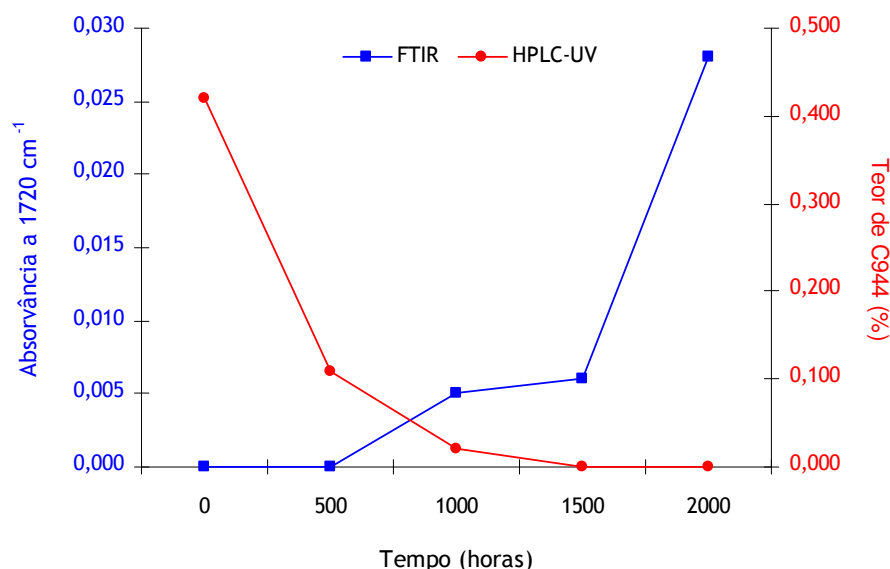


Figura 9.60 - Evolução do teor de C944 *versus* evolução da absorvância a 1720 cm<sup>-1</sup> durante a exposição do geotêxtil B4-500 aos agentes climáticos no QUV.

A comparação dos resultados de FTIR com os resultados da análise cromatográfica do C944 permitiu estabelecer uma relação entre a foto-degradação sofrida pelo geotêxtil B4-500 e a evolução do teor de C944: à medida que aumentou o tempo de exposição (aumento da radiação UV incidente total), o teor de C944 diminuiu (deixando o geotêxtil B4-500 sucessivamente mais desprotegido contra os agentes climáticos) e a absorvância a 1720 cm<sup>-1</sup> aumentou (indicando sucessivamente a ocorrência de uma maior degradação no geotêxtil B4-500).

#### 9.4 - Considerações finais

Neste capítulo, avaliou-se a resistência dos geotêxteis ao envelhecimento climático sob condições artificiais. Para tal, os geotêxteis foram expostos a vários agentes climáticos (radiação UV, chuva e orvalho) no QUV. A simulação laboratorial dos danos que ocorrem nos geotêxteis durante meses ou anos de envelhecimento natural pode ser muito importante para avaliar o modo como os materiais se vão comportar em condições reais.

No próximo capítulo, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais. Os resultados obtidos ao ar livre serão comparados com os resultados obtidos em laboratório (comparação no ponto 10.5). Assim, procurar-se-á estabelecer uma relação entre o envelhecimento natural dos materiais e o seu envelhecimento acelerado em laboratório.



# CAPÍTULO 10

## Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais

### 10.1 - Introdução

A exposição prolongada dos geossintéticos aos agentes climáticos pode afectar a durabilidade dos materiais e, consequentemente, o seu desempenho ao longo do tempo. Na maioria das aplicações, o período de exposição dos geossintéticos aos agentes climáticos é relativamente pequeno (apenas durante o período de instalação), sendo subsequentemente protegidos pelo solo ou por líquidos. No entanto, em determinadas aplicações, os geossintéticos podem estar total ou parcialmente expostos aos agentes climáticos durante um intervalo de tempo maior (por vezes alguns meses ou mesmo anos). Deste modo, é importante avaliar a resistência dos materiais ao envelhecimento causado pela acção dos agentes climáticos.

A resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos pode ser determinada através da exposição dos materiais ao ar livre (sob condições de degradação naturais) ou através de previsões baseadas em resultados experimentais obtidos em simuladores laboratoriais (Capítulo 9). No entanto, existem alguns factores (tais como, os poluentes atmosféricos, o vento, a sujidade acumulada, entre outros) que dificilmente poderão ser simulados em laboratório. Assim, a exposição dos geossintéticos aos agentes climáticos reais permite uma melhor avaliação do comportamento dos materiais quando expostos às condições ambientais de um determinado local.

Neste capítulo, procede-se à determinação da resistência dos geotêxteis à degradação causada pela exposição aos agentes climáticos reais. Os geotêxteis foram expostos ao ar livre durante um longo período de tempo (36 meses) e, periodicamente, foram caracterizadas as suas propriedades físicas (massa por unidade de área e espessura), mecânicas (ensaio de tracção-extensão, rasgamento e punçoamento estático) e hidráulicas (permeabilidade à água normal ao plano). Os geotêxteis foram também caracterizados por microscopia electrónica de varrimento com microanálise por raio X. O teor de C944 existente nos materiais foi monitorizado por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção UV.

Por fim, os resultados obtidos nos ensaios climáticos sob condições reais serão comparados com os resultados obtidos no simulador climático QUV (Capítulo 9). Assim, procurar-se-á estabelecer uma correlação entre o envelhecimento natural dos geotêxteis e o seu envelhecimento acelerado em laboratório.

## 10.2 - Descrição do ensaio de exposição aos agentes climáticos reais

Os geotêxteis foram expostos aos agentes climáticos reais nas instalações da LIPOR II (localidade de Moreira da Maia, concelho da Maia, distrito do Porto). O local de exposição situa-se à latitude de  $41^{\circ}13'N$  e à longitude de  $8^{\circ}39'W$ , possuindo uma elevação de cerca de 49 metros acima do nível do mar. A Figura 10.1 ilustra o local de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais: o local de exposição encontra-se assinalado nas imagens através de uma seta verde (Figura 10.1a) e através de uma circunferência vermelha (Figura 10.1b).



Figura 10.1 - Local de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) mapa com indicação da localização geográfica; (b) imagem de satélite do local de exposição. (mapa obtido no *Google Maps*; imagem de satélite obtida no *Google Earth*)

Os geotêxteis foram fixados em estruturas metálicas especificamente desenvolvidas para expor os materiais aos agentes climáticos reais. As estruturas metálicas (de 2 tipos diferentes, designados por tipo I e por tipo II) foram construídas com ferro galvanizado, com chapa galvanizada e com uma rede metálica. No total, foram construídas 4 estruturas metálicas: uma do tipo I (Figura 10.2a) (com 6 unidades) e três do tipo II (Figura 10.2b) (uma com 5 unidades e duas com 4 unidades cada).

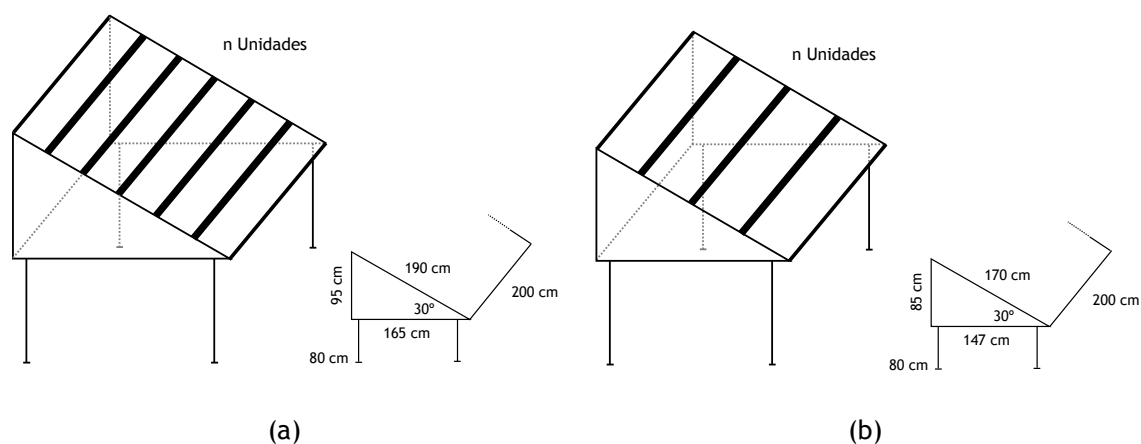


Figura 10.2 - Esquema das estruturas metálicas usadas para expor os geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) estrutura do tipo I; (b) estrutura do tipo II.

As estruturas metálicas (área de exposição total de 67 m<sup>2</sup>) foram instaladas com orientação para Sul e permitem a exposição dos materiais com uma inclinação de 30°. A Figura 10.3 ilustra as estruturas metálicas usadas para expor os geotêxteis aos agentes climáticos reais.



Figura 10.3 - Estruturas metálicas usadas para expor os geotêxteis aos agentes climáticos reais: (a) vista geral de uma estrutura (tipo II); (b) pormenor de uma unidade da estrutura.

As barras horizontais existentes nas estruturas metálicas (barras pretas que podem ser observadas na Figura 10.3) servem como local de fixação dos geotêxteis à estrutura. O afastamento entre estas barras (aspecto que distingue os dois tipos de estruturas construídas) limita o tamanho dos provetes a expor aos agentes climáticos reais: as estruturas do tipo I permitem a fixação de provetes com 30 cm de comprimento (dimensões adequadas, por exemplo, para os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319) e as estruturas do tipo II permitem a fixação de provetes com um comprimento de 40 cm.

A rede que reveste toda a zona útil de exposição da estrutura metálica serviu como meio de suporte dos provetes. A utilização de uma rede (estrutura aberta) permite uma boa lavagem e secagem dos provetes, evita a retenção de grandes quantidades de lixo e permite que os provetes sofram a acção do vento (a utilização de um material maciço provocaria uma pior lavagem e secagem dos provetes, originaria a acumulação de maiores quantidades de lixo e reduziria a acção do vento).

Os geotêxteis foram fixados na estrutura metálica através de placas metálicas (placas colocadas em cima das zonas de fixação dos materiais e aparafusadas às barras horizontais). As placas metálicas protegem as zonas de fixação dos provetes da acção dos agentes climáticos, evitando a ocorrência de danos significativos nessas zonas. No caso dos provetes destinados a ensaios de tracção-extensão, a zona de fixação dos provetes na estrutura metálica é a zona usada para a fixação dos provetes nas garras do equipamento de tracção. Devido à forma dos provetes para os ensaios de rasgamento e de punção estático, não foi possível proteger da acção dos agentes climáticos as zonas por onde os provetes foram fixados durante os respectivos ensaios mecânicos (no entanto, esta falta de protecção não originou comportamentos irregulares dos provetes durante os ensaios mecânicos). As placas metálicas utilizadas para fixar os materiais possuíam tratamento adequado (galvanizadas e pintadas) para não sofrerem degradação durante a exposição aos agentes climáticos reais.



A Figura 10.4 ilustra os geotêxteis expostos às condições climáticas reais.



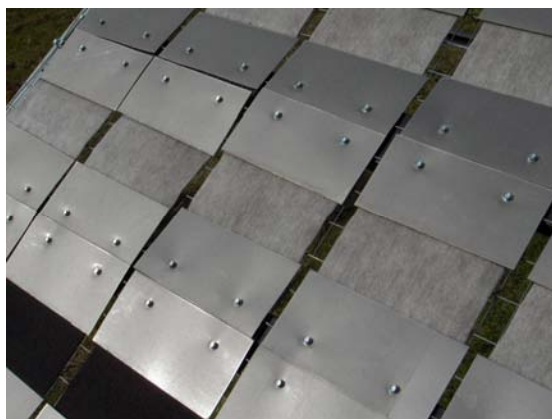
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10.4 - Geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais: (a) vista geral das 4 estruturas metálicas; (b) vista geral da estrutura metálica do tipo I; (c) pormenor de uma unidade da estrutura metálica do tipo I; (d) pormenor do sistema de fixação dos provetes à estrutura metálica.

Os geotêxteis foram expostos aos agentes climáticos reais por um período máximo de 36 meses (entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007), ao longo dos quais foram periodicamente recolhidos provetes para caracterização física, química, mecânica e hidráulica (Quadro 10.1).



Quadro 10.1 - Calendário de recolha dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais.

| Tempo (meses)   | 3         | 6         | 9         | 12        | 15        | 18        | 21        | 24        | 30        | 36        |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Data de recolha | Fev. 2005 | Mai. 2005 | Ago. 2005 | Nov. 2005 | Fev. 2006 | Mai. 2006 | Ago. 2006 | Nov. 2006 | Mai. 2007 | Nov. 2007 |

A caracterização física dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais foi efectuada através de ensaios de determinação da massa por unidade de área (NP EN ISO 9864; ponto 4.3) e de ensaios de determinação da espessura (NP EN ISO 9863-1; ponto 4.4) (determinação da massa por unidade de área e da espessura para um número mínimo de 10 provetes). A existência de alterações visíveis nos materiais foi avaliada a olho nu e por MEV.

A caracterização mecânica dos geotêxteis foi efectuada através de ensaios de tracção-extensão (NP EN ISO 10319; ponto 4.5), através de ensaios de rasgamento (ASTM D4533; ponto 4.7) e através de ensaios de punçoamento estático (NP EN ISO 12236; ponto 4.8) (número mínimo de 6 provetes nos ensaios de tracção-extensão, 10 provetes nos ensaios de rasgamento e 5 provetes nos ensaios de punçoamento estático; provetes na direcção do fabrico para os ensaios de tracção-extensão e de rasgamento).

A caracterização hidráulica dos geotêxteis envolveu ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano (NP EN ISO 11058, ponto 4.9) (número de mínimo de 5 provetes).

A caracterização química dos geotêxteis foi efectuada por HPLC-UV (para determinar o teor de C944 existente nos geotêxteis) e por espectroscopia de raio X (para determinar a composição elementar dos geotêxteis). As análises cromatográficas e as microanálises por raio X foram apenas realizadas para alguns geotêxteis expostos.

O Quadro 10.2 resume os ensaios efectuados para a caracterização física, mecânica e hidráulica dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.2 - Ensaios realizados para a caracterização física, mecânica e hidráulica dos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais.

| Tempo (meses) | B0-280 | B2-280 | B4-280 | B0-500  | B2-500  | B4-500  | P2-280 | P2-500  |
|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 3             | ET     | ---    | ---    | ET      | ---     | ---     | ---    | ---     |
| 6             | MET    | MET    | MET    | METRPHS | METRPHS | METRPHS | MET    | METRPHS |
| 9             | ET     | ---    | ---    | ET      | ---     | ---     | ---    | ---     |
| 12            | MET    | MET    | MET    | METRPHS | METRPHS | METRPHS | MET    | METRPHS |
| 15            | ET     | ---    | ---    | ET      | ---     | ---     | ---    | ---     |
| 18            | MET    | MET    | MET    | METRPHS | METRPHS | METRPHS | MET    | METRPHS |
| 21            | ET     | ---    | ---    | METH    | ---     | ---     | ---    | ---     |
| 24            | ---    | MET    | MET    | METRP   | METRPHS | METRPHS | MET    | METRPHS |
| 30            | ---    | MET    | MET    | ---     | METS    | METS    | MET    | METS    |
| 36            | ---    | MET    | MET    | ---     | METS    | METS    | MET    | METS    |

(M - massa por unidade de área; E - espessura; T - tracção-extensão; R - rasgamento; P - punçoamento estático; H - permeabilidade à água normal ao plano; S - MEV)

### 10.3 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climáticos

Os principais parâmetros meteorológicos (radiação incidente, temperatura, precipitação, humidade relativa e velocidade do vento) foram continuamente registados durante os 36 meses de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais. A caracterização meteorológica do local de exposição é indispensável para comparar a degradação sofrida pelos geotêxteis naquele local específico com a degradação sofrida pelos mesmos materiais num outro local ou mesmo em simuladores climáticos.

Os valores da temperatura, da humidade relativa e da velocidade do vento (valores horários) foram gentilmente cedidos pela LIPOR II (a ocorrência de uma avaria na estação meteorológica impediu a recolha de valores entre 01 de Outubro de 2006 e 12 de Fevereiro de 2007; nesse período, os valores foram obtidos no Instituto de Meteorologia, I.P. - Portugal). A humidade relativa do ar (expressa em percentagem) mede a quantidade de vapor de água existente no ar em relação ao máximo de vapor de água que o ar poderia conter à mesma temperatura (o ar seco possui a 0% de humidade relativa e o ar saturado possui 100% de humidade relativa). A temperatura é expressa em °C e a velocidade do vento é expressa em  $\text{Km.h}^{-1}$ .

Os valores da radiação solar global (valores horários acumulados) e da precipitação (valores diários acumulados) foram obtidos no Instituto de Meteorologia, I.P. - Portugal (estação meteorológica do Porto/Pedras Rubras). A radiação solar global (entre os 300 nm e os 3000 nm) é expressa em  $\text{MJ.m}^{-2}$ , enquanto que a precipitação é expressa em mm (por exemplo, 10 mm de precipitação significa que, num determinado período de tempo, caíram 10 L de precipitação numa área de  $1 \text{ m}^2$ ). Infelizmente, não foi possível obter os valores da radiação solar na zona UV (apenas entre os 290 nm e os 400 nm), o que dificulta a comparação dos resultados obtidos durante a exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais com os resultados obtidos no simulador climático QUV.

A variação dos principais parâmetros meteorológicos entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007 encontra-se ilustrada nas Figuras 10.5, 10.6, 10.7, 10.8 e 10.9.

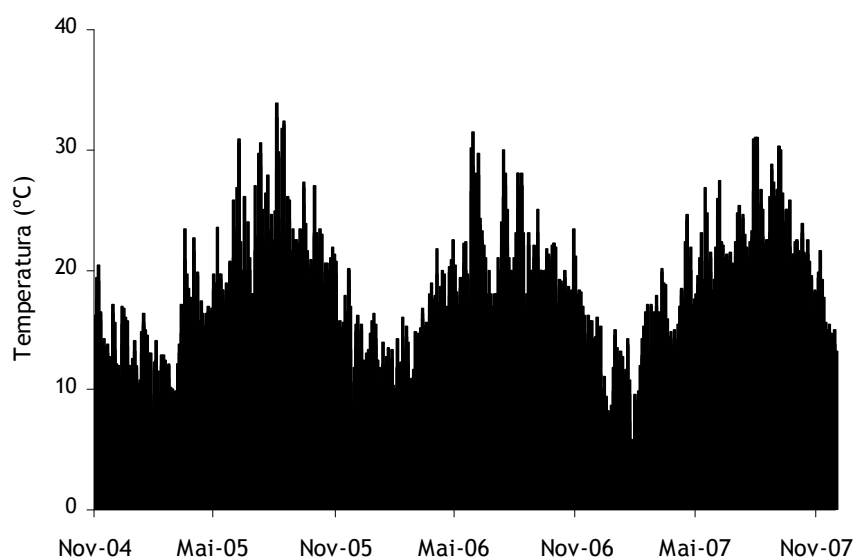


Figura 10.5 - Temperatura média diária entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.

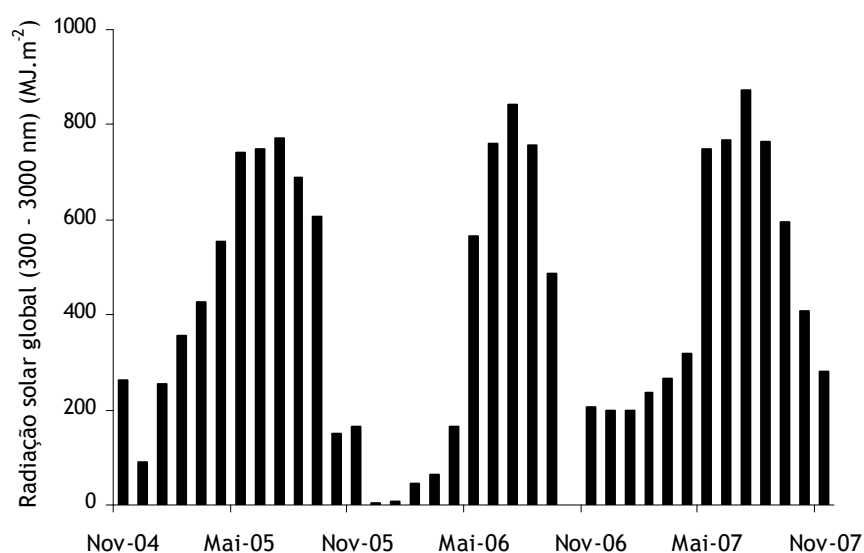


Figura 10.6 - Radiação solar global (300 nm a 3000 nm) acumulada mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007 (valores inexistentes para Outubro de 2006).

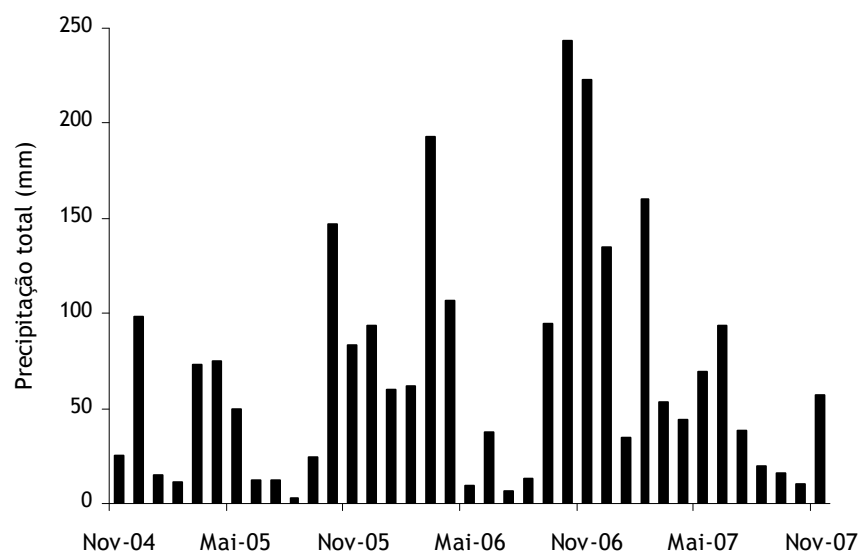


Figura 10.7 - Precipitação acumulada mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.

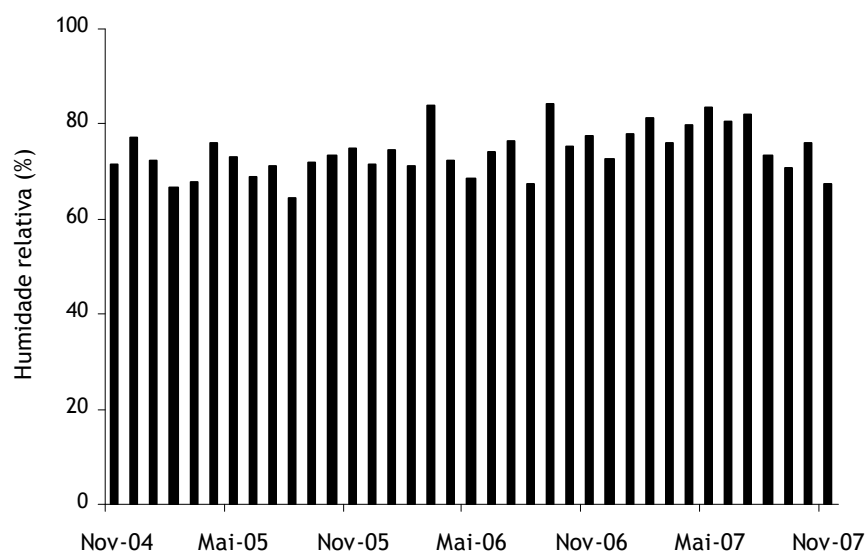


Figura 10.8 - Humidade relativa média mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.

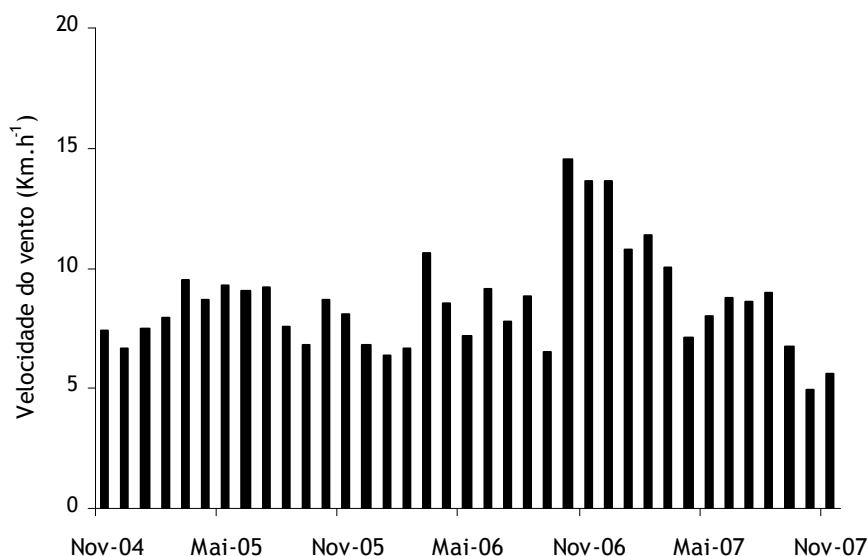


Figura 10.9 - Velocidade do vento média mensal entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007.

A temperatura média do ar foi maior nos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro (média mensal acima dos 20,5 °C) e menor nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (média mensal abaixo dos 13,5 °C). Os meses mais quentes foram Agosto de 2005 (média mensal de 25,1 °C) e Agosto de 2007 (média mensal de 24,2 °C), enquanto que os meses mais frios foram Janeiro de 2007 (média mensal de 9,9 °C) e Outubro de 2006 (média mensal de 10,2 °C). O dia mais quente foi 5 de Agosto de 2005 (média diária de 33,8 °C) e o dia mais frio foi 26 de Janeiro de 2007 (média diária de 4,7 °C).

A radiação solar incidente foi maior nos meses de Julho de 2007 (radiação incidente total de 871,7 MJ.m<sup>-2</sup>) e Julho de 2006 (radiação incidente total de 842,4 MJ.m<sup>-2</sup>). Os meses mais chuvosos foram Outubro de 2006 (precipitação total de 243,0 mm) e Novembro de 2006 (precipitação total de 223,0 mm), enquanto que os meses menos chuvosos foram Agosto de 2005 (precipitação total de 2,6 mm) e Julho de 2006 (precipitação total de 7,0 mm).

A humidade relativa média mensal variou entre os 64,5% (Agosto de 2005) e os 84,2% (Setembro de 2006). A velocidade do vento foi mais elevada nos meses de Outubro de 2006 (média mensal de 14,5 Km.h<sup>-1</sup>) e Novembro de 2006 (média mensal de 13,7 Km.h<sup>-1</sup>). O dia mais ventoso foi 25 de Novembro de 2006 (média diária de 30,2 Km.h<sup>-1</sup>). A velocidade máxima atingida pelo vento foi registada a 5 de Fevereiro de 2006 (velocidade instantânea de 86,4 Km.h<sup>-1</sup>).

O Quadro 10.3 resume os valores totais da radiação solar incidente e da precipitação, bem como os valores médios da temperatura, da humidade relativa e da velocidade do vento a que os geotêxteis estiveram sujeitos durante os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A temperatura média do ar foi idêntica (valores entre os 16,7 °C e os 17,8 °C) para os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, com excepção para os 3 e para os 6 meses de exposição (12,2 °C e 14,0 °C, respectivamente). A humidade relativa média (valores entre os 70,7% e os 74,2%) e a velocidade do vento média (valores entre os 7,1 Km.h<sup>-1</sup> e os 8,9 Km.h<sup>-1</sup>) também foram idênticas para os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.3 - Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total, humidade relativa média e velocidade do vento média durante os vários tempos de exposição dos geotêxteis aos agentes climáticos reais.

| Tempo de exposição (meses) | Temperatura média do ar (°C) | Radiação solar incidente total* (MJ.m <sup>-2</sup> ) | Precipitação total (mm) | Humidade relativa média (%) | Velocidade do vento média (Km.h <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|------------------------------|---|-------------------------|-----------------------------|---|
| 3                          | 12,2                         | 656   | 115,7                   | 72,8                        | 7,1   |
| 6                          | 14,0                         | 2189  | 317,7                   | 72,3                        | 8,2   |
| 9                          | 17,0                         | 4448  | 349,9                   | 70,7                        | 8,3   |
| 12                         | 17,8                         | 5612  | 573,9                   | 71,4                        | 8,1   |
| 15                         | 16,7                         | 5671  | 798,9                   | 71,7                        | 7,8   |
| 18                         | 16,7                         | 6146  | 1120,9                  | 72,5                        | 8,0   |
| 21                         | 17,4                         | 8540  | 1187,0                  | 72,2                        | 8,1   |
| 24                         | 17,6                         | 9475  | 1580,5                  | 73,0                        | 8,4   |
| 30                         | 16,9                         | 11251   | 2205,3                  | 74,0                        | 8,9   |
| 36                         | 17,7                         | 15086   | 2421,3                  | 74,2                        | 8,6   |

(\*entre os 300 nm e os 3000 nm)

## 10.4 - Resultados experimentais

### 10.4.1 - Inspeção visual

A cor dos geotêxteis B0-280, B0-500, B2-280, B2-500, B4-280 e B4-500 (originalmente branca) ficou cinzenta durante a exposição aos agentes climáticos devido à acumulação de sujidade (poeiras e pequenas partículas de lixo) entre as fibras dos materiais. A cor dos geotêxteis P2-280 e P2-500 não sofreu alteração durante a exposição aos agentes climáticos (os materiais mantiveram a sua cor preta original). A Figura 10.10 ilustra o aspecto dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 ao fim de 6 meses de exposição ao ar livre.

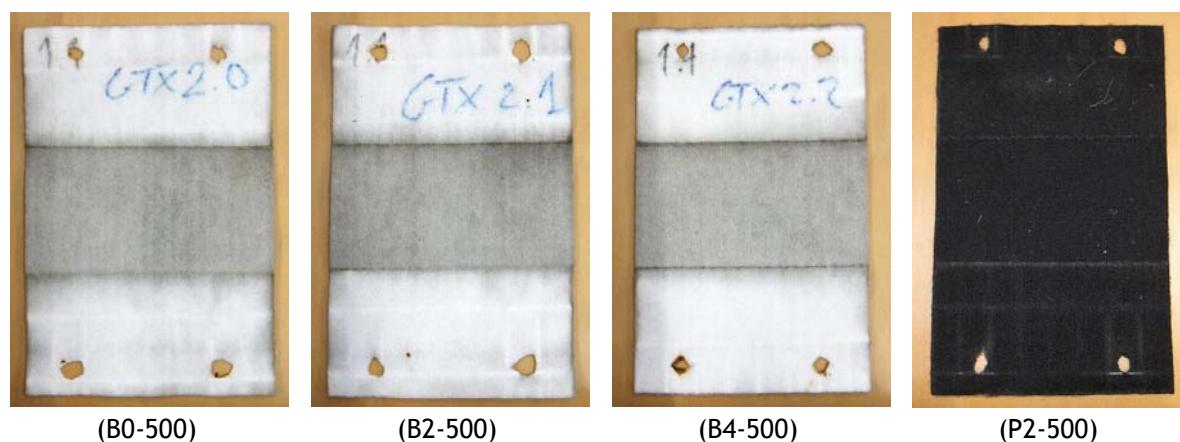


Figura 10.10 - Aspecto dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais. (apenas a zona central dos provetes esteve exposta aos agentes climáticos)

Após os primeiros 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais, não foram encontrados sinais visíveis de degradação nos geotêxteis. Aos 9 meses de exposição, os geotêxteis B0-280 e B0-500 (não estabilizados) libertavam alguns pequenos pedaços de fibras quebradas (quase pó), o que indicou a existência de degradação nos materiais. Ao fim de 12 meses de exposição, os geotêxteis sem C944 estavam muito danificados: os materiais estavam muito frágeis e libertavam uma grande quantidade de fibras degradadas, o que resultou numa redução da sua espessura (facilmente visível a olho nu).

Os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500 não apresentavam sinais visíveis de degradação após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais. No entanto, estes materiais estavam mais duros e/ou rígidos devido à acumulação de poeiras e pequenos pedaços de lixo entre as suas fibras. A Figura 10.11 compara a espessura do geotêxtil B0-500 com a espessura do geotêxtil B2-500 ao fim de 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

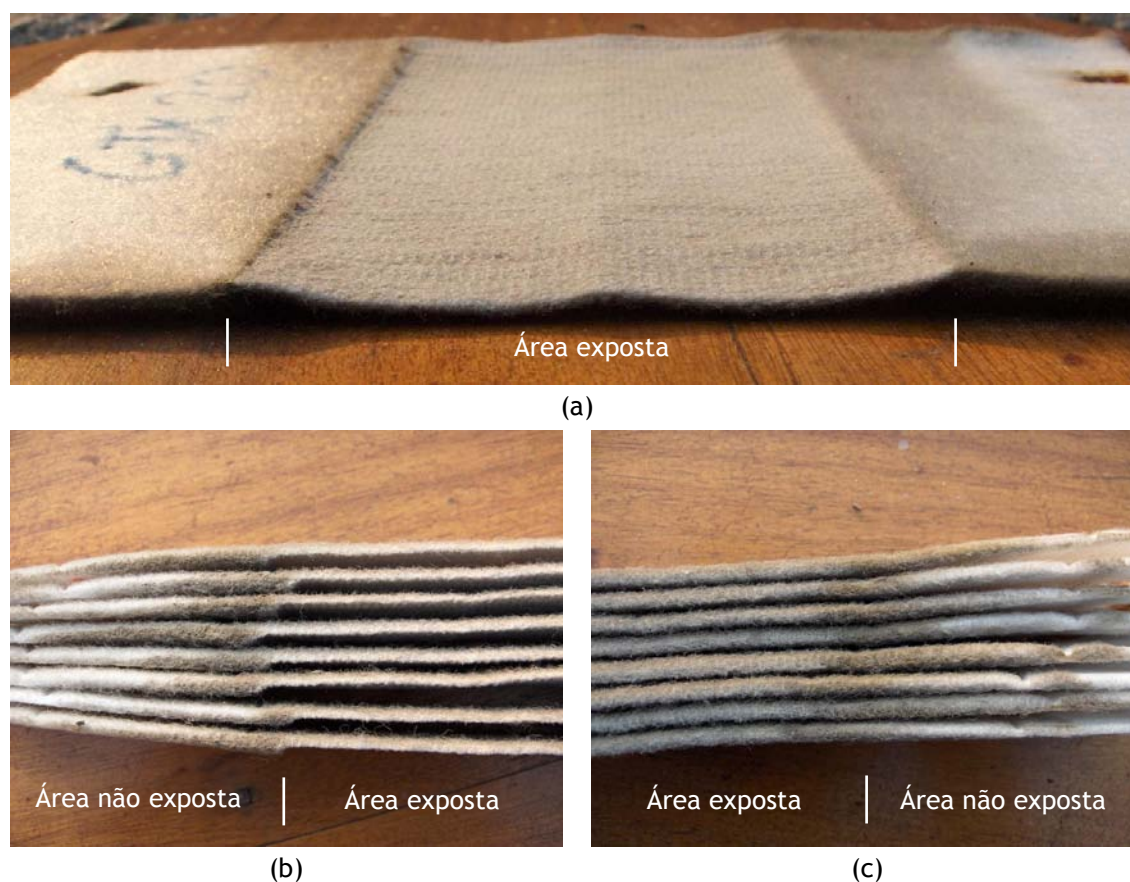


Figura 10.11 - Aspecto dos geotêxteis após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxtil B0-500; (b) espessura do geotêxtil B0-500; (c) espessura do geotêxtil B2-500.

Os geotêxteis B0-280 e B0-500 estavam muito danificados após 18 meses de exposição ao ar livre: os materiais libertavam muitas fibras degradadas e estavam muito frágeis (muito perto da degradação completa). O geotêxtil B0-280 possuía zonas onde a quantidade de fibras existente era muito baixa, permitindo a passagem de alguma luz através dos materiais (Figura 10.12). Essas zonas (com alguma “transparência” devido à baixa quantidade de fibras existente) não foram encontradas no geotêxtil B0-500 (material com maior espessura). Os restantes geotêxteis não apresentavam sinais visíveis de degradação ao fim de 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais.



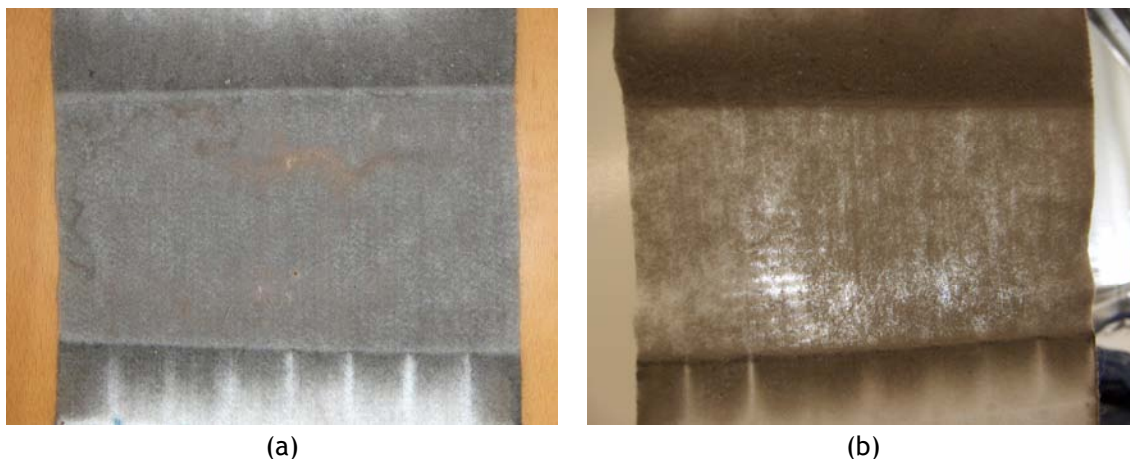


Figura 10.12 - Aspecto do geotêxtil B0-280 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) aspecto geral de um provete; (b) provete com luz de fundo (para realçar a falta de fibras).

A degradação total do geotêxtil B0-280 ocorreu entre os 18 e os 21 meses de exposição aos agentes climáticos reais. De facto, após 21 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 estava completamente destruído: os provetes estavam transformados em pedaços, alguns dos quais podiam ser encontrados dispersos pelo chão (transportados pelo vento) nas imediações do local de exposição.

O geotêxtil B0-500 ainda não tinha sido completamente destruído ao fim de 21 meses de exposição ao ar livre. No entanto, apresentava zonas extremamente frágeis, onde a quantidade de fibras ainda existente era muito pequena (zonas com alguma “transparência”). De um modo geral, o geotêxtil B0-500 estava muito próximo da degradação total (podia ser manualmente destruído sem grandes dificuldades). A Figura 10.13 ilustra o aspecto dos geotêxteis B0-280 e B0-500 depois de 21 meses de exposição aos agentes climáticos reais.



(a)

(a Figura 10.13 continua na página seguinte)

(continuação da Figura 10.13)



Figura 10.13 - Aspecto dos geotêxteis B0-280 e B0-500 após 21 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxteis B0-280 (fila de cima) e B0-500 (fila de baixo) nos suportes metálicos; (b) geotêxtil B0-280; (c) geotêxtil B0-500.

Ao fim de 24 meses de exposição ao ar livre, o geotêxtil B0-500 estava totalmente destruído (alguns provetes rasgaram por completo, outros possuíam vários orifícios). Alguns restos do geotêxtil B0-500 (pequenos pedaços do material) podiam ser encontrados espalhados pelo chão nas proximidades do local de exposição. A Figura 10.14 ilustra o aspecto do geotêxtil B0-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

Os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500 não apresentavam danos visíveis ao fim de 24 meses de exposição ao ar livre. No entanto, foram encontradas algumas espécies vegetais nos materiais (musgo e algum verdete). O desenvolvimento destas espécies ocorreu devido ao lixo acumulado entre as fibras dos materiais (que serviu como substrato para o seu crescimento) e devido à humidade existente nos materiais (os 24 meses de exposição foram atingidos no mês de Novembro de 2006; dos 36 meses totais de exposição, Outubro de 2006 e Novembro de 2006 foram os meses com maior quantidade de precipitação total). As espécies vegetais estavam presentes, em maior ou em menor quantidade, em todos os geotêxteis expostos ao ar livre (Figura 10.15).

Após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais, os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500 permaneciam sem danos visíveis. As espécies vegetais existiam agora em menor quantidade que aos 24 meses, provavelmente devido ao aumento da temperatura e ao menor teor de humidade existente nos materiais (os 30 meses de exposição foram atingidos no mês de Maio de 2007).

Atingidos os 36 meses totais de exposição ao ar livre, os geotêxteis B2-280, B2-500, B4-280, B4-500, P2-280 e P2-500 continuavam sem sinais visíveis de degradação. Os materiais apresentavam uma grande quantidade de lixo e poeira acumulada entre as suas fibras, estavam bastante duros e/ou rígidos e ainda possuíam algum musgo e/ou verdete (embora em muito menor quantidade que aos 24 meses; a precipitação total em Outubro e Novembro de 2007 foi muito menor do que em Outubro e Novembro de 2006). A Figura 10.16 ilustra o aspecto dos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 após os 36 meses totais de exposição aos agentes climáticos reais.





(a)



(b)

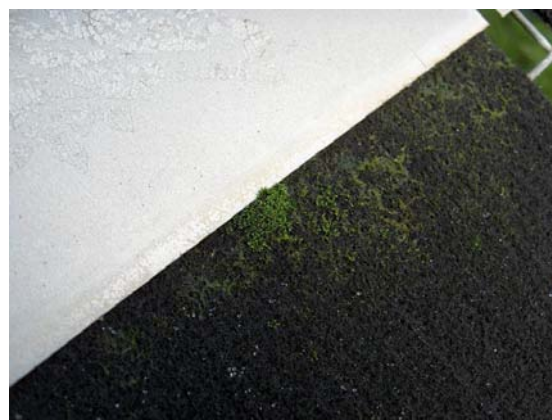


(c)

Figura 10.14 - Aspecto do geotêxtil B0-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) aspecto geral dos provetes; (b) provete com orifícios; (c) restos de um provete.



(a)



(b)

Figura 10.15 - Aspecto dos geotêxteis após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) geotêxtil B4-500 com verdete; (b) geotêxtil P2-500 com musgo e verdete.

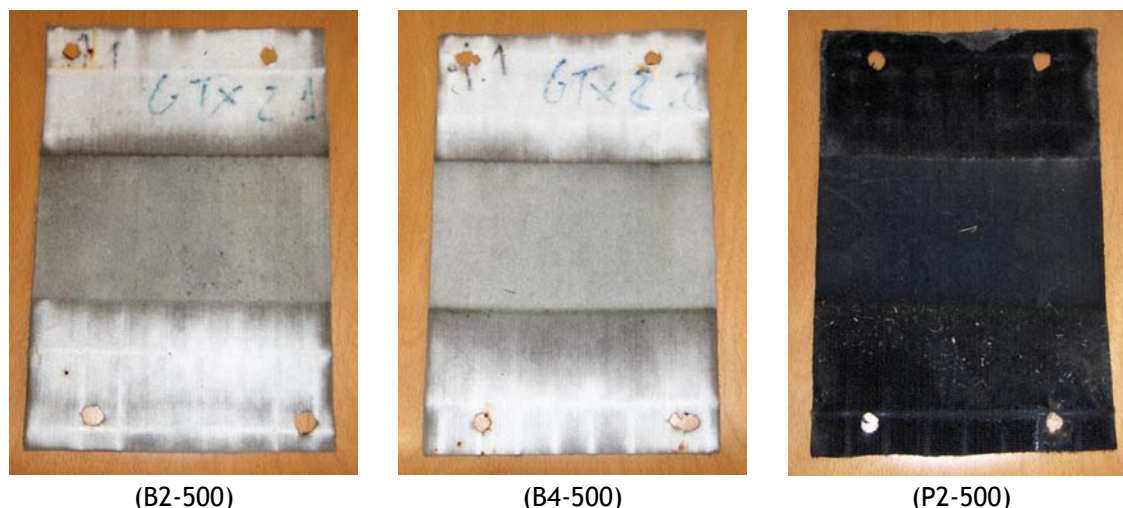


Figura 10.16 - Aspecto dos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais. (apenas a zona central dos provetes esteve exposta aos agentes climáticos)

#### 10.4.2 - Determinação da massa por unidade de área

##### 10.4.2.1 - Geotêxteis brancos com $280 \text{ g.m}^{-2}$ : B0-280, B2-280 e B4-280

Os valores das massas por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280, determinados antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se no Quadro 10.4.

Quadro 10.4 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Massa por unidade de área ( $\text{g.m}^{-2}$ ) |            |            |
|----------|---|------------|------------|
|          | B0-280  | B2-280     | B4-280     |
| Intacto  | 283 (11%)                                       | 272 (7,8%) | 263 (7,6%) |
| 6 Meses  | 245 (13%)                                       | 303 (13%)  | 290 (8,3%) |
| 12 Meses | 216 (12%)                                       | 240 (4,3%) | 318 (15%)  |
| 18 Meses | 136 (20%)                                       | 266 (9,1%) | 295 (6,4%) |
| 24 Meses | Material destruído                              | 245 (6,2%) | 351 (18%)  |
| 30 Meses | ---   | 241 (12%)  | 322 (17%)  |
| 36 Meses | ---   | 222 (13%)  | 319 (17%)  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

O geotêxtil B0-280 sofreu uma diminuição considerável da sua massa por unidade de área ao longo da exposição aos agentes climáticos reais. Depois de 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava uma massa por unidade de área de  $136 \text{ g.m}^{-2}$ , menos de metade do seu valor original ( $283 \text{ g.m}^{-2}$ ); esta diminuição pode ser explicada pela libertação de uma grande quantidade de fibras degradadas (o que causou a perda de massa polimérica). A determinação da massa por unidade de área do geotêxtil B0-280 foi possível até aos 18 meses de exposição (o material foi completamente destruído pela exposição a intervalos de tempo superiores).



Com a excepção dos primeiros 6 meses, a massa por unidade de área do geotêxtil B2-280 diminuiu durante a exposição ao ar livre (diminuição muito menor do que a ocorrida no geotêxtil B0-280). Ao fim de 36 meses, o geotêxtil B2-280 possuía uma massa por unidade de área de  $222 \text{ g.m}^{-2}$ , cerca de 82% do seu valor original ( $272 \text{ g.m}^{-2}$ ); esta diminuição poderá ser devida à ocorrência de degradação no geotêxtil B2-280 (degradação imperceptível a olho nu), o que terá causado a libertação de fibras degradadas.

A massa por unidade de área do geotêxtil B4-280 sofreu um aumento após a exposição aos agentes climáticos reais. Depois de 36 meses de exposição, o geotêxtil B4-280 apresentava uma massa por unidade de área de  $319 \text{ g.m}^{-2}$ , um valor muito superior ao seu valor original ( $263 \text{ g.m}^{-2}$ ). O aumento ocorrido não foi provocado, obviamente, por um ganho de massa polimérica, mas sim devido à acumulação de sujidade (poeiras, pequenas partículas de lixo trazidas pelo vento) entre as fibras do material (a acumulação de sujidade entre as fibras dos geotêxteis foi facilmente perceptível a olho nu).

A comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais encontra-se ilustrada na Figura 10.17.

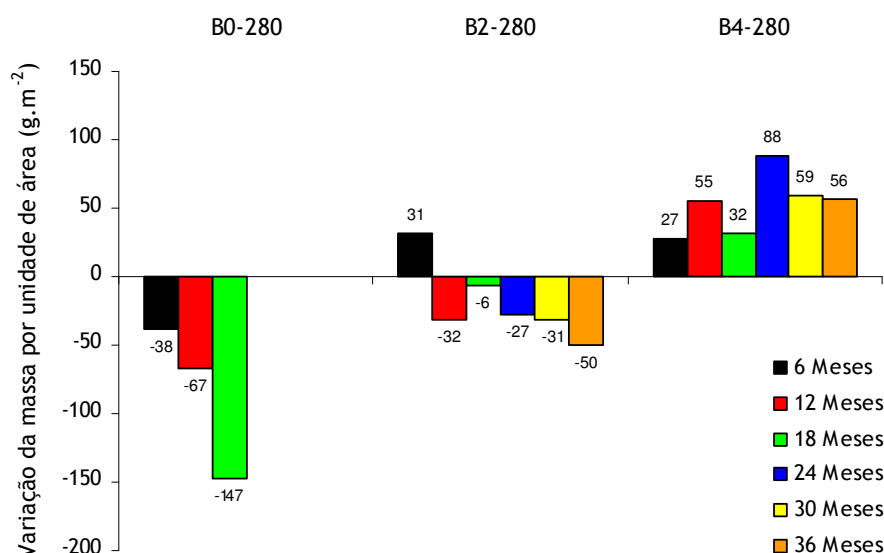


Figura 10.17 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

As massas por unidade de área dos geotêxteis B0-280 (não estabilizado) e B2-280 (estabilizado com 0,2% de C944) diminuíram durante a exposição aos agentes climáticos reais (redução muito maior para o geotêxtil B0-280), enquanto que a massa por unidade de área do geotêxtil B4-280 (com 0,4% de C944) aumentou. De facto, após 24 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 já estava totalmente destruído, a massa por unidade de área do geotêxtil B2-280 diminuiu  $27 \text{ g.m}^{-2}$  e a massa por unidade de área do B4-280 aumentou em  $88 \text{ g.m}^{-2}$  relativamente ao valor original.

A sujidade acumulada pelos geotêxteis B2-280 e B4-280 foi, em princípio, muito semelhante para os dois materiais. Assim, a diminuição da massa por unidade de área do geotêxtil B2-280 (é importante

notar que a massa por unidade de área do geotêxtil B4-280 aumentou) é mais uma indicação da ocorrência de degradação neste material (com a libertação de fibras degradadas e, consequente, perda de massa polimérica).

As diferenças observadas na variação das massas por unidade de área dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 podem ser explicadas pelos diferentes graus de estabilização dos materiais. A incorporação de 0,2% de C944 nas fibras de PP retardou significativamente a degradação sofrida pelos geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos reais, evitando uma diminuição da massa por unidade de área do geotêxtil B2-280 tão elevada como a diminuição observada para o geotêxtil B0-280 (não estabilizado).

O aumento ocorrido na massa por unidade de área do geotêxtil B4-280 após a exposição aos agentes climáticos reais é um indício da inexistência de danos avultados na estrutura do material. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nos geotêxteis resultou numa melhor protecção dos materiais contra a degradação promovida pelos agentes climáticos.

#### 10.4.2.2 - Geotêxteis brancos com 500 g.m<sup>-2</sup>: B0-500, B2-500 e B4-500

O Quadro 10.5 resume os valores obtidos para as massas por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

| Quadro 10.5 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais. |  |            |            |
|---|--|------------|------------|
| Tempo   | Massa por unidade de área (g.m <sup>-2</sup> ) |            |            |
|   | B0-500   | B2-500     | B4-500     |
| Intacto   | 501 (13%)                                      | 502 (7,0%) | 510 (7,7%) |
| 6 Meses   | 461 (12%)                                      | 491 (8,9%) | 527 (7,7%) |
| 12 Meses  | 399 (16%)                                      | 520 (7,3%) | 622 (6,8%) |
| 18 Meses  | 300 (15%)                                      | 504 (12%)  | 622 (10%)  |
| 21 Meses  | 157 (6,6%)                                     | ---        | ---        |
| 24 Meses  | Material destruído                             | 529 (6,1%) | 604 (8,4%) |
| 30 Meses  | ---  | 527 (7,1%) | 639 (9,0%) |
| 36 Meses  | ---  | 509 (9,6%) | 593 (3,6%) |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A massa por unidade de área do geotêxtil B0-500 sofreu uma grande diminuição durante a exposição aos agentes climáticos reais. Após 18 e 21 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía massas por unidade de área de, respectivamente, 300 g.m<sup>-2</sup> (60% do valor original) e 157 g.m<sup>-2</sup> (31% do valor original), mostrando a ocorrência de uma rápida degradação do material. De facto, passados mais 3 meses (aos 24 meses de exposição), o geotêxtil B0-500 estava completamente destruído. Tal como para o geotêxtil B0-280, a diminuição da massa por unidade de área do geotêxtil B0-500 deveu-se à degradação das fibras de PP (libertação de grandes quantidades de resíduos de fibras degradadas).

Ao contrário do observado para o geotêxtil B2-280, a massa por unidade de área do geotêxtil B2-500 sofreu um ligeiro aumento com a exposição aos agentes climáticos reais (excepção após 6 meses). Ao fim de 36 meses de exposição, o geotêxtil B2-500 possuía uma massa por unidade de área ( $509 \text{ g.m}^{-2}$ ) muito idêntica ao seu valor original ( $502 \text{ g.m}^{-2}$ ). O aumento da massa por unidade de área do geotêxtil B2-500 deveu-se à acumulação de sujidade na sua estrutura. A diferença observada entre o geotêxtil B2-500 e o geotêxtil B2-280 (diminuição da massa por unidade de área após a exposição aos agentes climáticos) será discutida mais à frente.

A massa por unidade de área do geotêxtil B4-500 aumentou significativamente com a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 36 meses, a massa por unidade de área do geotêxtil B4-500 era de  $593 \text{ g.m}^{-2}$ , um aumento de  $83 \text{ g.m}^{-2}$  relativamente ao valor original ( $510 \text{ g.m}^{-2}$ ). A massa por unidade de área do geotêxtil B4-500 apresentou um máximo após 30 meses de exposição, com um valor de  $639 \text{ g.m}^{-2}$  (incremento de  $129 \text{ g.m}^{-2}$  em relação ao valor original). Uma vez mais, o aumento da massa por unidade de área pode ser explicado pela acumulação de uma grande quantidade de sujidade entre as fibras do geotêxtil B4-500.

A Figura 10.18 compara as variações das massas por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

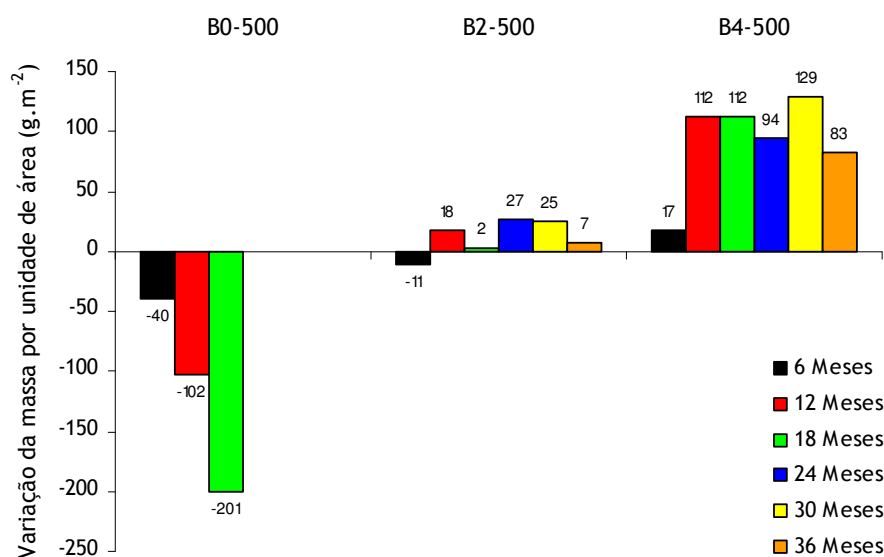


Figura 10.18 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

O aumento ocorrido na massa por unidade de área do geotêxtil B4-500 após a exposição aos agentes climáticos reais foi muito superior ao aumento ocorrido para o geotêxtil B2-500. Dado que os dois geotêxteis são estruturalmente muito semelhantes (a maior diferença entre os materiais é o teor de C944), é legítimo esperar que a quantidade de sujidade acumulada durante a exposição aos agentes climáticos tenha sido praticamente igual em ambos os materiais. Assim, as diferenças observadas nas massas por unidade de área dos dois geotêxteis apenas poderão ser explicadas pela ocorrência de degradação no geotêxtil B2-500 (com consequente perda de massa polimérica). A degradação do geotêxtil B4-500, a existir, ocorreu em menor extensão que no geotêxtil B2-500 (a incorporação de uma maior quantidade de C944 resultou numa maior resistência aos agentes climáticos reais).

A evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis durante a exposição ao ar livre depende de dois aspectos: (1) libertação de fibras degradadas e (2) acumulação de sujidade entre as fibras dos materiais. O primeiro causa uma diminuição da massa por unidade de área (devido à perda de massa polimérica), enquanto que o segundo provoca um “falso” aumento da mesma propriedade.

O incremento da massa por unidade de área ocorrido no geotêxtil B4-500 foi superior ao ocorrido no geotêxtil B4-280, o que indica que o material com maior massa por unidade de área (e também com maior espessura) pode acumular mais sujidade na sua estrutura. Assim, é possível avançar com uma tentativa de explicação para o aumento da massa por unidade de área do geotêxtil B2-500 e para a diminuição (da mesma propriedade) no geotêxtil B2-280: para o geotêxtil B2-280, o ganho de massa devido à acumulação de sujidade foi menor que a perda de massa ocorrida devido à degradação da estrutura polimérica; no geotêxtil B2-500, a retenção de uma maior quantidade de sujidade que o geotêxtil B2-280 originou um ganho de massa capaz de compensar a perda de massa polimérica.

#### 10.4.2.3 - Geotêxteis pretos: P2-280 e P2-500

Os valores das massas por unidade de área dos geotêxteis P2-280 e P2-500, determinados antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, estão resumidos no Quadro 10.6.

Quadro 10.6 - Evolução da massa por unidade de área dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Massa por unidade de área ( $\text{g.m}^{-2}$ ) |            |
|----------|---|------------|
|          | P2-280  | P2-500     |
| Intacto  | 284 (12%)                                       | 499 (7,7%) |
| 6 Meses  | 311 (7,0%)                                      | 506 (4,1%) |
| 12 Meses | 346 (8,5%)                                      | 545 (6,9%) |
| 18 Meses | 356 (7,5%)                                      | 576 (7,5%) |
| 24 Meses | 307 (9,8%)                                      | 542 (7,4%) |
| 30 Meses | 335 (14%)                                       | 551 (9,0%) |
| 36 Meses | 309 (8,6%)                                      | 599 (12%)  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A massa por unidade de área dos geotêxteis P2-280 e P2-500 aumentou após os vários períodos de exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 36 meses, o geotêxtil P2-280 possuía uma massa por unidade de área de  $309 \text{ g.m}^{-2}$  (aumento de  $25 \text{ g.m}^{-2}$  em relação ao valor original -  $284 \text{ g.m}^{-2}$ ), ao passo que o geotêxtil P2-500 apresentava uma massa por unidade de área de  $599 \text{ g.m}^{-2}$  (aumento de  $100 \text{ g.m}^{-2}$  relativamente ao valor original -  $499 \text{ g.m}^{-2}$ ). O aumento da massa por unidade de área dos geotêxteis P2-280 e P2-500 ocorreu devido à acumulação de sujidade entre as fibras dos materiais.

O aumento da massa por unidade de área ocorrido no geotêxtil P2-500 foi quase sempre superior ao ocorrido no geotêxtil P2-280 (excepções observadas ao fim de 6 e 12 meses de exposição), o que mostra, mais uma vez, que os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  podem acumular mais sujidade do que os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ .

A massa por unidade de área do geotêxtil P2-280 aumentou após a exposição ao ar livre, enquanto que a massa por unidade de área do geotêxtil B2-280 diminuiu (os dois geotêxteis são idênticos, com a excepção da presença, ou não, de negro de carbono) (Figura 10.19). A diferença observada entre os dois materiais confirma a ocorrência de degradação no geotêxtil B2-280 e permite concluir que a incorporação de negro de carbono (1,08%) nos geotêxteis de PP resulta numa estabilização extra dos materiais contra a acção dos agentes climáticos reais.

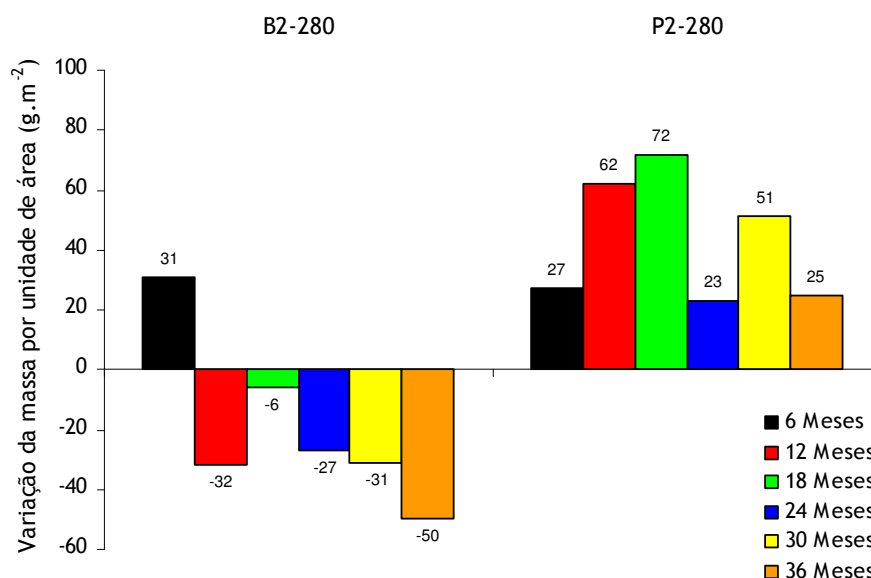


Figura 10.19 - Comparação da variação da massa por unidade de área dos geotêxteis B2-280 e P2-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

O aumento da massa por unidade de área do geotêxtil P2-500 foi superior ao aumento ocorrido no geotêxtil B2-500, o que é mais um indício da ocorrência de alguma degradação no geotêxtil B2-500. Além disso, confirma a protecção extra obtida pela adição de negro de carbono às fibras de PP.

#### 10.4.3 - Determinação da espessura

##### 10.4.3.1 - Geotêxteis brancos com 280 g.m<sup>-2</sup>: B0-280, B2-280 e B4-280

Os valores das espessuras dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280, obtidos antes e depois dos vários períodos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidos no Quadro 10.7.

A espessura do geotêxtil B0-280, com a excepção para os valores determinados após 3 e 6 meses de exposição, diminuiu com a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 18 meses, o geotêxtil B0-280 possuía uma espessura de 1,81 mm, aproximadamente 56% do valor original (3,21 mm). A diminuição da espessura foi facilmente perceptível a olho nu e ocorreu devido à libertação de uma grande quantidade de fibras degradadas.

A diminuição gradual da espessura do geotêxtil B0-280 ao longo do tempo de exposição indica que as fibras superiores do material (fibras directamente expostas aos agentes climáticos) vão sendo sucessivamente degradadas (com consequente perda de massa polimérica) e, em seguida, removidas da superfície do mesmo (quer pela acção do vento, quer pela acção da chuva). A remoção das fibras

superiores degradadas faz com que as fibras localizadas imediatamente abaixo destas fiquem sob a acção directa dos agentes climáticos reais (as fibras superiores podem proteger as fibras situadas mais abaixo, por exemplo, resguardando-as da exposição directa à radiação solar).

Quadro 10.7 - Evolução da espessura dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Espessura (mm)     |             |             |
|----------|--------------------|-------------|-------------|
|          | B0-280             | B2-280      | B4-280      |
| Intacto  | 3,21 (4,7%)        | 3,16 (4,8%) | 3,17 (4,5%) |
| 3 Meses  | 3,34 (4,0%)        | ---         | ---         |
| 6 Meses  | 3,73 (3,6%)        | 3,40 (3,7%) | 3,51 (3,1%) |
| 9 Meses  | 2,61 (3,3%)        | ---         | ---         |
| 12 Meses | 2,46 (5,5%)        | 3,39 (3,6%) | 3,58 (2,2%) |
| 15 Meses | 2,26 (3,6%)        | ---         | ---         |
| 18 Meses | 1,81 (4,2%)        | 3,35 (4,7%) | 3,37 (2,4%) |
| 21 Meses | Material destruído | ---         | ---         |
| 24 Meses | ---                | 3,31 (3,4%) | 3,48 (3,0%) |
| 30 Meses | ---                | 3,01 (3,7%) | 3,34 (2,0%) |
| 36 Meses | ---                | 2,80 (4,7%) | 3,49 (4,6%) |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A espessura do geotêxtil B2-280 sofreu um aumento e depois uma redução durante a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 6 meses de exposição, a espessura do geotêxtil B2-280 era de 3,40 mm (aumento de 0,24 mm face à espessura original), uma espessura idêntica à espessura após 12 meses de exposição (3,39 mm). A partir dos 12 meses, a espessura diminuiu com o aumento do tempo de exposição. De facto, ao fim de 24 meses, a espessura do geotêxtil B2-280 era de 3,31 mm (aumento de 0,15 mm em relação à espessura original), enquanto que, após 36 meses, era de 2,80 mm (redução de 0,36 mm em relação à espessura original).

O aumento inicial da espessura do geotêxtil B2-280 ocorreu devido à acumulação de sujidade entre as suas fibras. A posterior redução da espessura poderá ser explicada pela ocorrência de degradação no material (que originou uma perda de massa polimérica). Estes resultados estão de acordo com os resultados da massa por unidade de área, que indicaram a ocorrência de degradação no geotêxtil B2-280 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

A espessura do geotêxtil B4-280 aumentou após a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 36 meses, o material apresentava uma espessura de 3,49 mm, um valor superior ao original (3,17 mm). O aumento ocorrido na espessura do geotêxtil B4-280 pode ser explicado pela acumulação de sujidade no material (o que também provocou um aumento da sua massa por unidade de área).



O aumento da espessura dos geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos reais pode ser explicado pela acumulação de sujidade. A sujidade é acumulada principalmente nos espaços livres existentes entre as fibras (preenchendo esses espaços) e não superficialmente por cima ou por baixo dos materiais (a sujidade que se acumula nessas zonas é facilmente lavada pela acção da chuva ou levada pela acção do vento). O preenchimento dos espaços livres existentes entre as fibras torna os geotêxteis mais rígidos e menos compressíveis. Assim, e lembrando que a espessura dos geotêxteis foi determinada pela aplicação de uma pressão (2 kPa) aos provetes, a menor compressibilidade dos provetes expostos aos agentes climáticos resulta num aumento da espessura.

À semelhança da massa por unidade de área, a variação da espessura dos geotêxteis durante a sua exposição aos agentes climáticos reais também depende de dois aspectos: (1) da perda de fibras degradadas (o que provoca uma diminuição da espessura) e (2) da acumulação de sujidade entre as fibras dos materiais (o que origina um aumento da espessura). A Figura 10.20 compara a variação da espessura dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 após os diversos tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

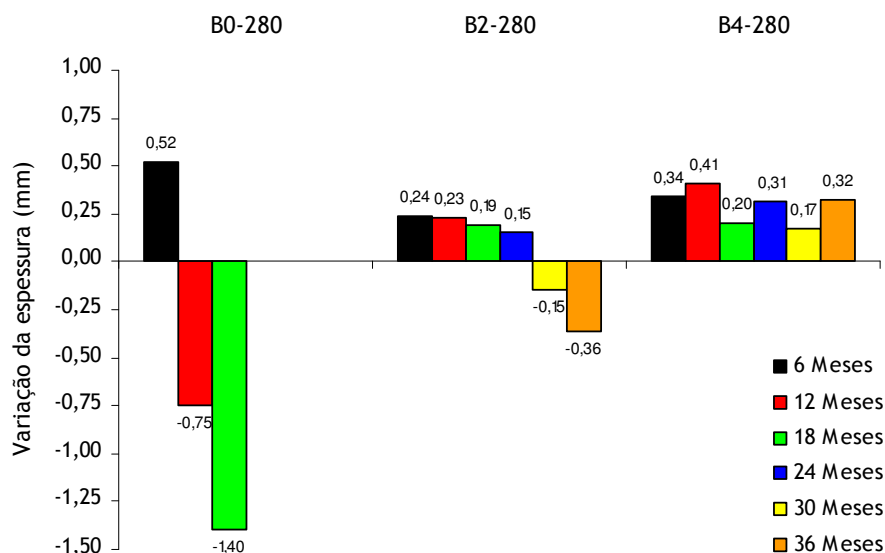


Figura 10.20 - Comparação da variação da espessura dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

Dado que a acumulação de sujidade nos geotêxteis provoca um aumento da sua espessura, seria de esperar que, caso não existisse degradação, a variação da espessura dos geotêxteis B2-280 e B4-280 fosse muito idêntica (uma vez que a sujidade acumulada também seria idêntica). O menor aumento ou mesmo a diminuição da espessura do geotêxtil B2-280 em relação ao geotêxtil B4-280 é mais um indício da ocorrência de degradação neste material.

As diferenças observadas na variação das espessuras dos geotêxteis B0-280, B2-280 e B4-280 podem ser explicadas pelos diferentes graus de estabilização dos materiais. A espessura do geotêxtil B0-280 (sem C944) sofreu uma grande diminuição após a exposição aos agentes climáticos, consequência da maior degradação sofrida por este material (devido à inexistência de protecção química contra os agentes em causa). A degradação dos geotêxteis de PP foi retardada pela incorporação do aditivo

químico C944. De facto, no geotêxtil B2-280 (com 0,2% de C944) a espessura sofreu um aumento inicial (provocado pela acumulação de sujidade) e depois diminuiu ao longo do tempo (indicando a existência de alguma degradação no material). A espessura do geotêxtil B4-280 (com 0,4% de C944) aumentou (não havendo indícios da ocorrência de degradação neste material), o que indicou que a presença de uma maior quantidade de C944 resultou numa melhor protecção contra a degradação promovida pelos agentes climáticos reais.

#### 10.4.3.2 - Geotêxteis brancos com 500 g.m<sup>-2</sup>: B0-500, B2-500 e B4-500

O Quadro 10.8 resume os valores das espessuras dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.8 - Evolução da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Espessura (mm)     |             |             |
|----------|--------------------|-------------|-------------|
|          | B0-500             | B2-500      | B4-500      |
| Intacto  | 3,81 (4,5%)        | 3,81 (2,8%) | 3,97 (2,5%) |
| 3 Meses  | 4,01 (3,0%)        | ---         | ---         |
| 6 Meses  | 3,93 (1,8%)        | 3,91 (1,4%) | 4,05 (2,1%) |
| 9 Meses  | 2,91 (0,4%)        | ---         | ---         |
| 12 Meses | 2,83 (5,1%)        | 3,97 (1,6%) | 4,17 (2,0%) |
| 15 Meses | 2,58 (3,6%)        | ---         | ---         |
| 18 Meses | 2,48 (4,7%)        | 3,70 (4,0%) | 3,98 (1,8%) |
| 21 Meses | 1,93 (3,8%)        | ---         | ---         |
| 24 Meses | Material destruído | 3,49 (4,2%) | 4,01 (1,9%) |
| 30 Meses | ---                | 3,57 (2,4%) | 4,01 (2,7%) |
| 36 Meses | ---                | 3,36 (1,7%) | 3,86 (1,6%) |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A espessura do geotêxtil B0-500 sofreu uma diminuição considerável com a exposição aos agentes climáticos reais (excepto nos primeiros 6 meses, onde até ocorreu um ligeiro aumento). Após 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía 2,48 mm de espessura (65% do valor original). Ao fim de 21 meses de exposição, a espessura do material era apenas 1,93 mm (51% do valor original), o que indicou que a degradação estava a ocorrer muito rapidamente (redução de 0,55 mm entre os 18 e os 21 meses). De facto, 3 meses mais tarde (aos 24 meses), o geotêxtil B0-500 estava totalmente destruído. A diminuição da espessura durante a exposição ao ar livre pode ser explicada pela grande degradação ocorrida nas fibras de PP (o que originou uma grande perda de massa polimérica).

No caso do geotêxtil B2-500, a espessura sofreu um aumento inicial, seguido de uma diminuição. Ao fim de 12 meses de exposição, o material possuía uma espessura de 3,97 mm, um pequeno aumento em relação ao valor original (3,81 mm). Após 24 e 36 meses de exposição, a espessura do geotêxtil B2-500 era 3,49 mm (92% do valor original) e 3,36 mm (88% do valor original), respectivamente. A diminuição da espessura é mais um indício da ocorrência de degradação no geotêxtil B2-500 (o que está de acordo com os resultados obtidos na determinação da massa por unidade de área).

A espessura do geotêxtil B4-500 aumentou ligeiramente durante a exposição ao ar livre (excepção após 36 meses). Ao fim de 12 e 24 meses, o material apresentava, respectivamente, espessuras de 4,17 mm (aumento de 0,20 mm em relação ao valor original) e de 4,01 mm (aumento de 0,04 mm em relação ao valor original). Após 36 meses de exposição, a espessura do geotêxtil B4-500 era de 3,86 mm (97% do valor original). A sujidade acumulada pelo geotêxtil B4-500 (o que provocou um grande aumento da sua massa por unidade de área) não causou um aumento muito significativo da sua espessura.

A Figura 10.21 compara a variação da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

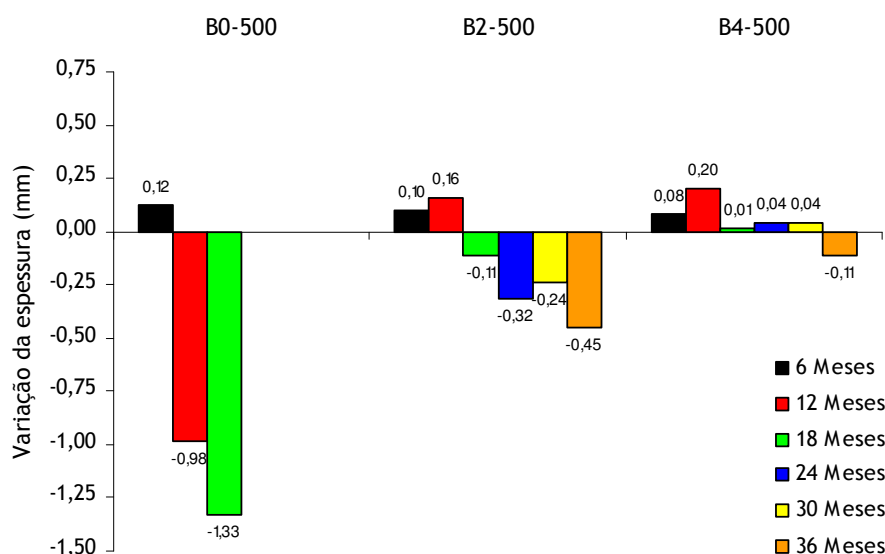


Figura 10.21 - Comparação da variação da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 ao longo da exposição aos agentes climáticos reais.

As diferenças observadas na variação da espessura dos geotêxteis B0-500, B2-500 e B4-500 mostram o papel protector do aditivo C944 contra a acção dos agentes climáticos. A redução da espessura foi muito maior para o geotêxtil B0-500 do que para o geotêxtil B2-500, indicando, mais uma vez, a existência de maior degradação no material não estabilizado. A presença de uma maior quantidade do aditivo C944 resultou numa menor degradação dos materiais (de um modo geral, a espessura do geotêxtil B2-500 diminuiu, enquanto que a espessura do geotêxtil B4-500 aumentou ligeiramente).

O aumento da espessura no geotêxtil B4-500 foi menor que o aumento (da mesma propriedade) no geotêxtil B4-280. Uma vez que o aumento da espessura se deve à acumulação de sujidade entre as fibras dos materiais, e dado que essa acumulação foi maior para o geotêxtil B4-500 (maior aumento da massa por unidade de área), poder-se-ia esperar que o aumento da espessura do geotêxtil B4-500 também fosse maior que o aumento da espessura do geotêxtil B4-280 (o que não aconteceu).

O resultado anterior poderá dever-se ao facto do geotêxtil B4-500 possuir uma estrutura bastante mais compacta (com uma maior densidade de fibras) do que o geotêxtil B4-280 (apesar da massa por unidade de área quase duplicar do geotêxtil B4-280 para o geotêxtil B4-500, a espessura original dos

materiais apenas aumenta ligeiramente). Assim, é de esperar, logo à partida, que o geotêxtil B4-500 seja menos compressível que o geotêxtil B4-280. Deste modo, e apesar de ter acumulado (em valor absoluto) uma menor quantidade de sujidade, o aumento da espessura foi mais pronunciado para o geotêxtil B4-280. O efeito da acumulação de sujidade na diminuição da compressibilidade (aumento da espessura) parece ser mais pronunciado para os geotêxteis de menor massa por unidade de área.

#### 10.4.3.3 - Geotêxteis pretos: P2-280 e P2-500

A evolução da espessura dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os 36 meses totais de exposição aos agentes climáticos reais encontra-se resumida no Quadro 10.9.

Quadro 10.9 - Evolução da espessura dos geotêxteis P2-280 e P2-500 durante os 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Espessura (mm) |             |
|----------|----------------|-------------|
|          | P2-280         | P2-500      |
| Intacto  | 3,03 (4,5%)    | 3,68 (3,6%) |
| 6 Meses  | 3,44 (3,0%)    | 3,84 (2,0%) |
| 12 Meses | 3,37 (2,6%)    | 4,02 (2,0%) |
| 18 Meses | 3,48 (3,4%)    | 3,92 (4,5%) |
| 24 Meses | 3,24 (3,6%)    | 4,05 (1,9%) |
| 30 Meses | 3,35 (2,2%)    | 3,97 (5,4%) |
| 36 Meses | 3,15 (2,8%)    | 4,00 (1,6%) |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A espessura do geotêxtil P2-280 aumentou após a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 36 meses de exposição, o geotêxtil P2-280 possuía 3,15 mm de espessura (aumento de 0,12 mm face ao valor original - 3,03 mm). A espessura do material apresentou um máximo após 18 meses de exposição, com um valor de 3,48 mm (incremento de 0,45 mm em relação ao valor original).

À semelhança do geotêxtil P2-280, a espessura do geotêxtil P2-500 também sofreu um aumento após a exposição ao ar livre. Ao fim de 36 meses de exposição, a espessura do material era de 4,00 mm (aumento de 0,32 mm face ao valor original - 3,68 mm). A espessura dos geotêxteis P2-280 e P2-500 aumentou devido à acumulação de sujidade na estrutura dos materiais.

O aumento da espessura do geotêxtil P2-280 foi quase sempre maior do que o aumento da espessura do geotêxtil P2-500 (excepções após 24 e 36 meses de exposição), apesar da quantidade de sujidade acumulada (em valor absoluto) ser tendencialmente superior no geotêxtil P2-500. Deste modo, estes resultados são mais um indício de que a acumulação de sujidade origina um efeito mais pronunciado na espessura dos geotêxteis com menor massa por unidade de área.

A comparação dos resultados obtidos para os geotêxteis P2-280 e B2-280 (a principal diferença entre os dois materiais é a presença ou não de negro de carbono) confirma a ocorrência de degradação no geotêxtil B2-280 e indica, mais uma vez, que a incorporação de negro de carbono nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos geotêxteis contra os agentes climáticos reais. A comparação dos resultados obtidos para os geotêxteis P2-500 e B2-500 conduzem a conclusões semelhantes.

#### 10.4.4 - Ensaios de tracção-extensão

##### 10.4.4.1 - Geotêxtil B0-280

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-280, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, estão resumidas no Quadro 10.10 e no Quadro 10.11. As respectivas curvas médias força-extensão encontram-se ilustradas na Figura 10.22.

Quadro 10.10 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| 3 Meses  | 12,2 (1,4%)                                 | 76,1 (11%)                   | <b>88,4</b>              |
| 6 Meses  | 7,78 (10%)                                  | 46,6 (7,6%)                  | <b>56,4</b>              |
| 9 Meses  | 2,25 (7,2%)                                 | 24,5 (8,7%)                  | <b>16,3</b>              |
| 12 Meses | 0,78 (28%)                                  | 18,6 (12%)                   | <b>5,6</b>               |
| 15 Meses | 0,38 (24%)                                  | 15,7 (11%)                   | <b>2,8</b>               |
| 18 Meses | 0,06 (40%)                                  | 3,0 (23%)                    | <b>0,4</b>               |
| 21 Meses | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.11 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|----------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| 3 Meses  | 8,6                                       | 13,6                                      | 18,1                                       | 21,9                                       | 578                            | <b>54,9</b>           |
| 6 Meses  | 15,7                                      | 18,3                                      | 21,0                                       | 22,1                                       | 248                            | <b>23,6</b>           |
| 9 Meses  | 9,5                                       | 11,9                                      | 12,5                                       | 10,7                                       | 48,4                           | <b>4,6</b>            |
| 12 Meses | 3,2                                       | 4,5                                       | 5,1  | 3,7  | 15,9                           | <b>1,5</b>            |
| 15 Meses | 2,4                                       | 3,1                                       | 3,1  | 1,6  | 6,8                            | <b>0,6</b>            |
| 18 Meses | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |
| 21 Meses | ---                                       | ---                                       | ---  | ---  | 0                              | <b>0</b>              |

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 diminuiu rapidamente durante a exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 6 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava uma resistência residual de apenas 56,4%. No entanto, não foi perceptível (a olho nu) a ocorrência de degradação no material durante os primeiros 6 meses de exposição.

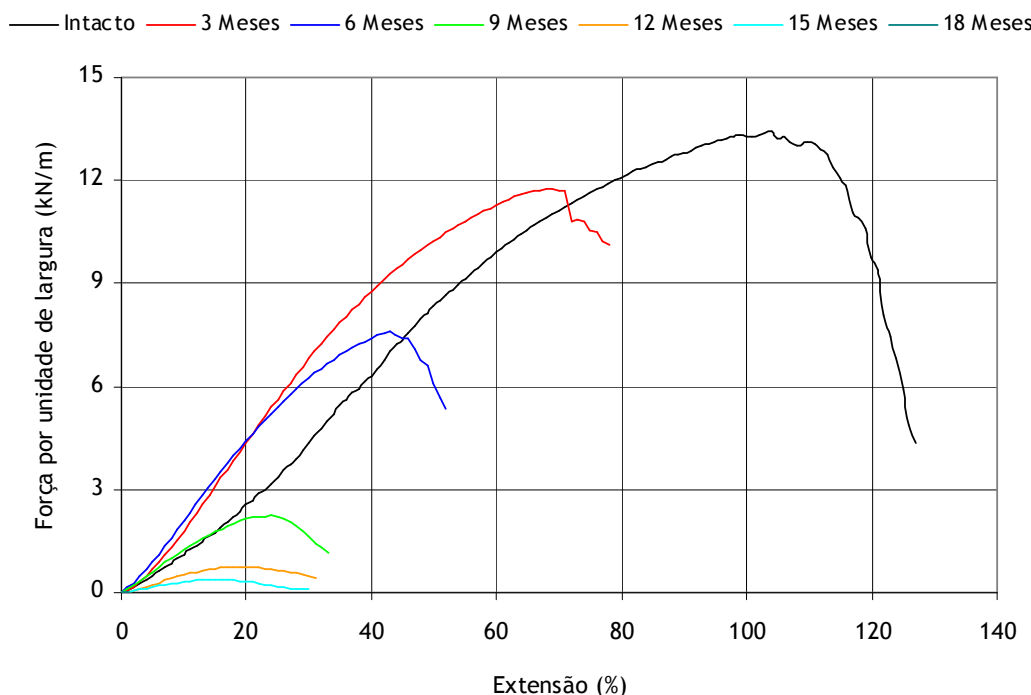


Figura 10.22 - Curvas médias força-estiramento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Depois de 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 possuía uma resistência residual muito baixa (apenas 5,6%), indicando a ocorrência de sérios danos na sua estrutura (a existência de uma elevada degradação no material era facilmente perceptível a olho nu). Ao fim de 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 estava muito danificado e próximo da degradação completa (resistência residual de 0,4%). Aos 21 meses, o material estava reduzido a pequenos pedaços (resistência residual nula). A variação da resistência à tracção do geotêxtil B0-280 está de acordo com a redução observada na massa por unidade de área e na espessura do material.

A diminuição da resistência à tracção foi acompanhada por uma redução da respectiva extensão. De facto, após 6 e 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava extensões na força máxima de 46,6% e de 18,6%, respectivamente (extensão original de 113%). Após 18 meses de exposição, a extensão na força máxima do material era de apenas 3,0%.

A robustez do geotêxtil B0-280 também diminuiu muito rapidamente à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos reais. Após apenas 3 meses de exposição, a robustez do material estava reduzida para cerca de metade (robustez residual de 54,9%). Depois de 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava uma robustez residual de apenas 1,5%. Aos 18 meses de exposição, a robustez residual do geotêxtil B0-280 era nula.

Os valores da rigidez secante determinados após 3 e 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais foram superiores aos valores de referência. Ao fim de 9 meses de exposição, a rigidez secante dos provetes expostos era semelhante à rigidez secante dos provetes de referência (excepção para o valor a 20%). Aos 12 e 15 meses de exposição, os valores da rigidez secante eram bastante inferiores

aos valores de referência. Assim, a exposição do geotêxtil B0-280 aos agentes climáticos causou, inicialmente, o aumento da rigidez secante do material e, em seguida, a sua diminuição em relação aos valores de referência.

#### 10.4.4.2 - Geotêxtil B2-280

As propriedades mecânicas do geotêxtil B2-280, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos, estão resumidas nos Quadros 10.12 e 10.13. As respectivas curvas médias força-extensão encontram-se representadas na Figura 10.23.

Quadro 10.12 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,1 (11%)                                   | 112 (8,1%)                   | ---                      |
| 6 Meses  | 9,67 (7,1%)                                  | 56,1 (9,2%)                  | 73,8                     |
| 12 Meses | 6,61 (5,9%)                                  | 43,2 (5,7%)                  | 50,5                     |
| 18 Meses | 5,48 (16%)                                   | 46,3 (12%)                   | 41,8                     |
| 24 Meses | 5,02 (14%)                                   | 33,7 (6,7%)                  | 38,3                     |
| 30 Meses | 3,87 (15%)                                   | 32,8 (8,3%)                  | 29,5                     |
| 36 Meses | 2,41 (36%)                                   | 26,1 (5,7%)                  | 18,4                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.13 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{\text{SEC}} 2\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|----------|--|--|---|---|------------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 6,9  | 9,2  | 10,5  | 11,7  | 976                                | ---                   |
| 6 Meses  | 11,4   | 16,0   | 22,6  | 23,0  | 382                                | 39,1                  |
| 12 Meses | 6,7  | 12,0   | 16,4  | 19,2  | 206                                | 21,1                  |
| 18 Meses | 4,3  | 7,9  | 11,9  | 14,5  | 133                                | 13,6                  |
| 24 Meses | 10,0   | 13,9   | 16,9  | 18,1  | 127                                | 13,0                  |
| 30 Meses | 3,8  | 7,6  | 12,2  | 13,9  | 78,0                               | 8,0                   |
| 36 Meses | 4,8  | 8,0  | 11,0  | 10,8  | 51,9                               | 5,3                   |

A resistência à tracção do geotêxtil B2-280 diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos reais (no entanto, a diminuição foi menor que a observada para o geotêxtil B0-280). Aos 18 meses de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía uma resistência residual de 41,8% (após o mesmo período, o geotêxtil B0-280 apresentava uma resistência residual de 0,4%). Ao fim de 36 meses de exposição, a resistência residual do geotêxtil B2-280 era de apenas 18,4%.

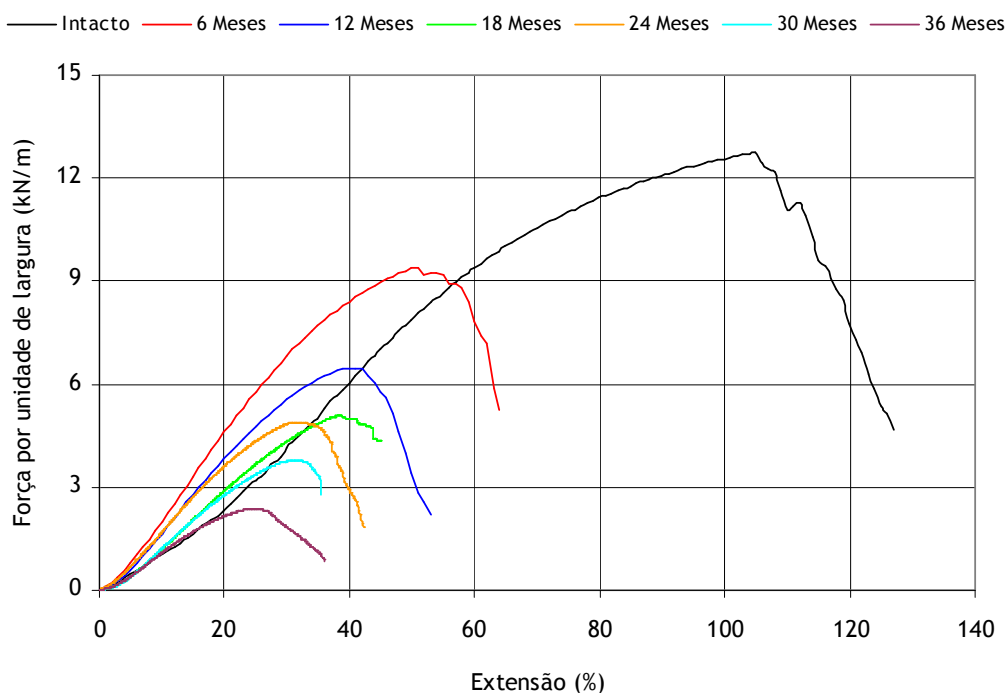


Figura 10.23 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A diminuição da resistência à tracção do geotêxtil B2-280 foi acompanhada por uma diminuição da sua extensão na força máxima. Após 6 meses de exposição, o material apresentava uma extensão na força máxima de 56,1%, metade do valor inicial (112%). Aos 24 e 36 meses de exposição, o geotêxtil B2-280 possuía extensões na força máxima de 33,7% e de 26,1%, respectivamente.

A robustez do geotêxtil B2-280 também diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos reais. Após 12 meses de exposição, a robustez residual do geotêxtil B2-280 era de 21,1%. Ao fim de 24 e 36 meses de exposição, o material possuía uma robustez residual de 13,0% e de 5,3%, respectivamente. De um modo geral, a exposição ao ar livre causou o aumento da rigidez secante do geotêxtil B2-280 (com excepção para os provetes expostos durante 36 meses).

O geotêxtil B2-280 não apresentava sinais visíveis de degradação após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos. No entanto, a diminuição da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da robustez mostra a existência de danos no material (a ocorrência de degradação neste material foi anteriormente sugerida pelas variações encontradas na sua massa por unidade de área e na sua espessura).

#### 10.4.4.3 - Geotêxtil B4-280

As propriedades mecânicas do geotêxtil B4-280, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidas nos Quadros 10.14 e 10.15. As respectivas curvas médias força-extensão estão ilustradas na Figura 10.24.



Quadro 10.14 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 14,0 (6,2%)                                  | 113 (7,8%)                   | ---                      |
| 6 Meses  | 11,9 (1,5%)                                  | 62,3 (6,5%)                  | <b>85,0</b>              |
| 12 Meses | 9,40 (2,2%)                                  | 48,2 (1,4%)                  | <b>67,1</b>              |
| 18 Meses | 7,81 (17%)                                   | 46,6 (5,0%)                  | <b>55,8</b>              |
| 24 Meses | 7,14 (9,0%)                                  | 35,7 (4,5%)                  | <b>51,0</b>              |
| 30 Meses | 6,57 (8,1%)                                  | 37,0 (10%)                   | <b>46,9</b>              |
| 36 Meses | 5,24 (9,4%)                                  | 29,3 (7,0%)                  | <b>37,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.15 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{SEC} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 15,7                                 | 15,4                                 | 15,1                                  | 16,1                                  | 1135                            | ---                   |
| 6 Meses  | 15,7                                 | 20,7                                 | 24,7                                  | 27,2                                  | 537                             | <b>47,3</b>           |
| 12 Meses | 10,3                                 | 17,2                                 | 21,9                                  | 25,0                                  | 323                             | <b>28,5</b>           |
| 18 Meses | 7,2                                  | 12,7                                 | 17,3                                  | 20,4                                  | 263                             | <b>23,2</b>           |
| 24 Meses | 13,5                                 | 18,7                                 | 22,5                                  | 24,2                                  | 173                             | <b>15,2</b>           |
| 30 Meses | 11,1                                 | 16,0                                 | 20,2                                  | 21,7                                  | 125                             | <b>11,0</b>           |
| 36 Meses | 12,3                                 | 16,4                                 | 20,3                                  | 20,7                                  | 112                             | <b>9,9</b>            |

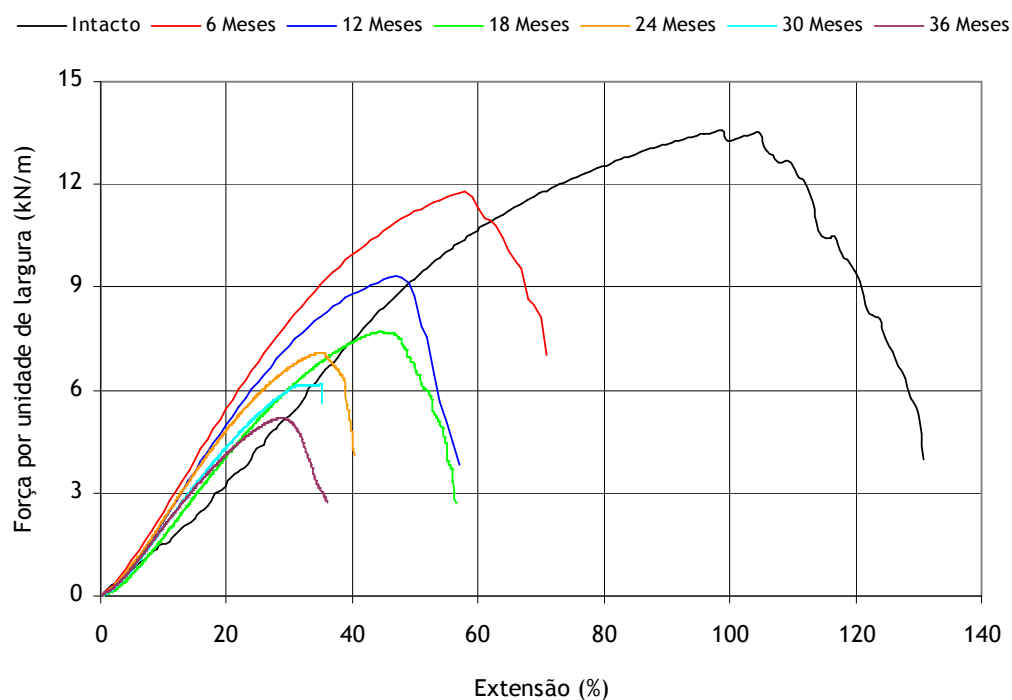


Figura 10.24 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Tal como para o geotêxtil B2-280, a resistência à tracção do geotêxtil B4-280 também diminuiu após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais (diminuição tanto maior quanto maior o tempo de exposição). No entanto, a diminuição ocorrida para o geotêxtil B4-280 foi menor que a observada para o geotêxtil B2-280. Ao fim de 36 meses de exposição, o geotêxtil B4-280 apresentava uma resistência residual de 37,4% (resistência residual de 18,4% para o geotêxtil B2-280).

A extensão na força máxima também diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais; aos 12, 24 e 36 meses de exposição, o geotêxtil B4-280 apresentava extensões na força máxima de, respectivamente, 48,2%, 35,7% e 29,3% (extensão original de 113%).

A robustez do geotêxtil B4-280 diminuiu após a exposição aos agentes climáticos reais. De facto, ao fim de apenas 6 meses de exposição, a robustez do material diminuiu para cerca de metade do valor original (robustez residual de 47,3%). O aumento do tempo de exposição causou uma redução adicional da robustez (robustez residual de 28,5%, 15,2% e 9,9% aos 12, 24 e 36 meses de exposição, respectivamente). A rigidez secante do geotêxtil B4-280, determinada às extensões de 10% e 20%, aumentou com a exposição aos agentes climáticos reais.

A inspecção visual, bem como a caracterização física (determinação da massa por unidade de área e da espessura) não indicaram a existência de danos no geotêxtil B4-280. No entanto, as diminuições da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da robustez mostraram que este material também sofreu degradação durante a exposição aos agentes climáticos reais.

#### 10.4.4.4 - Geotêxtil P2-280

As propriedades mecânicas do geotêxtil P2-280, obtidas antes e depois da exposição aos agentes climáticos reais, estão resumidas nos Quadros 10.16 e 10.17. A Figura 10.25 mostra as respectivas curvas médias força-extensão.

Quadro 10.16 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 14,3 (8,2%)                                 | 80,3 (7,3%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 15,4 (10%)                                  | 61,3 (10%)                   | <b>108</b>               |
| 12 Meses | 13,0 (6,5%)                                 | 41,4 (2,2%)                  | <b>90,9</b>              |
| 18 Meses | 12,8 (7,6%)                                 | 41,3 (5,6%)                  | <b>89,5</b>              |
| 24 Meses | 9,68 (12%)                                  | 31,8 (2,8%)                  | <b>67,7</b>              |
| 30 Meses | 10,4 (10%)                                  | 32,7 (2,5%)                  | <b>72,7</b>              |
| 36 Meses | 8,72 (7,9%)                                 | 28,7 (3,8%)                  | <b>61,0</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.17 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 20\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 24,9                                   | 23,8                                   | 23,0                                    | 23,9                                    | 786                               | ---                      |
| 6 Meses  | 28,9                                   | 32,0                                   | 36,1                                    | 37,0                                    | 571                               | <b>72,6</b>              |
| 12 Meses | 21,0                                   | 28,8                                   | 36,7                                    | 39,3                                    | 374                               | <b>47,6</b>              |
| 18 Meses | 16,1                                   | 25,3                                   | 34,0                                    | 37,4                                    | 366                               | <b>46,6</b>              |
| 24 Meses | 17,8                                   | 25,9                                   | 33,1                                    | 35,2                                    | 217                               | <b>27,6</b>              |
| 30 Meses | 19,1                                   | 29,8                                   | 36,9                                    | 38,1                                    | 242                               | <b>30,8</b>              |
| 36 Meses | 14,5                                   | 25,7                                   | 33,4                                    | 35,0                                    | 178                               | <b>22,6</b>              |

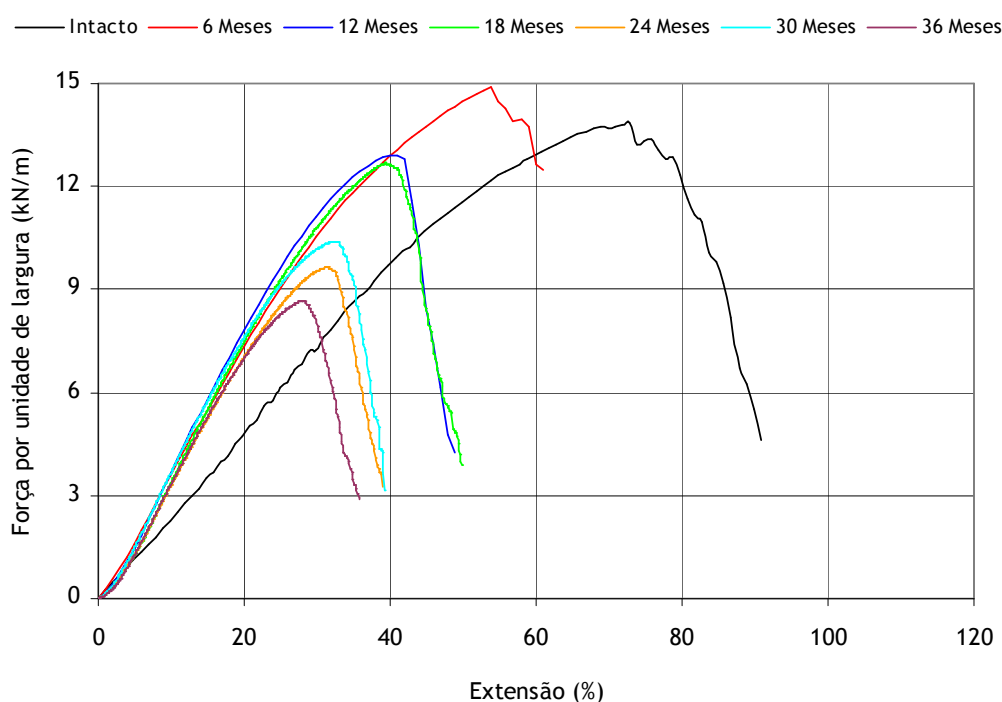


Figura 10.25 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A resistência à tracção do geotêxtil P2-280 também diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos reais (diminuição significativamente menor do que as observadas para os outros geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup>). De facto, o geotêxtil P2-280 possuía resistências residuais de 90,9%, 67,7% e 61,0% após 12, 24 e 36 meses de exposição, respectivamente. A extensão na força máxima também diminuiu com a exposição aos agentes em causa.

A acção dos agentes climáticos provocou uma redução na robustez do geotêxtil P2-280. De facto, ao fim de 12 meses de exposição, o material apresentava uma robustez residual de 47,6% (1,5% para o geotêxtil B0-280, 21,1% para o geotêxtil B2-280 e 28,5% para o geotêxtil B4-280). Aos 36 meses de exposição, o geotêxtil P2-280 possuía uma robustez residual de 22,6% (5,3% para o geotêxtil B2-280 e 9,9% para o geotêxtil B4-280).

A rigidez secante definida às extensões de 5%, 10% e 20% foi maior nos provetes do geotêxtil P2-280 expostos aos agentes climáticos do que nos provetes de referência (os provetes expostos estavam bastante mais rígidos).

As alterações ocorridas nas propriedades mecânicas (resistência à tracção, robustez e extensão na força máxima) do geotêxtil P2-280 mostram a existência de degradação neste material. No entanto, a caracterização física (determinação da massa por unidade de área e da espessura) não indiciou a existência de danos no material (através da inspecção visual também não foram observados nenhuns danos no geotêxtil P2-280).

#### 10.4.4.5 - Geotêxtil B0-500

Os valores das propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500, determinados antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, estão resumidos nos Quadros 10.18 e 10.19. As respectivas curvas médias força-extensão encontram-se ilustradas na Figura 10.26.

Quadro 10.18 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 25,6 (11%)                                  | 136 (12%)                    | ---                      |
| 3 Meses  | 27,4 (5,9%)                                 | 120 (9,0%)                   | <b>107</b>               |
| 6 Meses  | 19,0 (14%)                                  | 63,3 (7,1%)                  | <b>74,2</b>              |
| 9 Meses  | 12,3 (16%)                                  | 37,3 (8,1%)                  | <b>48,0</b>              |
| 12 Meses | 6,00 (22%)                                  | 22,7 (5,2%)                  | <b>23,4</b>              |
| 15 Meses | 2,92 (30%)                                  | 19,5 (10%)                   | <b>11,4</b>              |
| 18 Meses | 2,39 (69%)                                  | 18,8 (21%)                   | <b>9,3</b>               |
| 21 Meses | 0,10 (21%)                                  | 14,5 (22%)                   | <b>0,4</b>               |
| 24 Meses | 0   | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção do geotêxtil B0-500 diminuiu rapidamente ao longo da exposição aos agentes climáticos reais. Aos 6 e 12 meses de exposição, o material possuía resistências residuais de 74,2% e de 23,4%, respectivamente; após 18 meses de exposição, apresentava uma resistência residual de apenas 9,3%, o que comprovou a existência de danos muito significativos na sua estrutura. Ao fim de 21 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 estava muito perto da degradação completa (resistência residual de 0,4%). Aos 24 meses de exposição, o material tinha uma resistência à tracção nula.

A extensão na força máxima diminuiu à medida que o tempo de exposição aos agentes climáticos reais aumentou. De facto, após 6, 12 e 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía extensões na força máxima de 63,3%, 22,7% e 18,8%, respectivamente (extensão original de 136%).

Quadro 10.19 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 20\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,8                                   | 26,2                                   | 33,6                                    | 36,4                                    | 2382                              | ---                      |
| 3 Meses  | 37,0                                   | 42,7                                   | 48,3                                    | 48,1                                    | 1960                              | <b>82,3</b>              |
| 6 Meses  | 41,2                                   | 44,4                                   | 47,8                                    | 46,9                                    | 816                               | <b>34,3</b>              |
| 9 Meses  | 42,7                                   | 43,6                                   | 45,9                                    | 42,8                                    | 334                               | <b>14,0</b>              |
| 12 Meses | 28,1                                   | 30,6                                   | 32,3                                    | 28,2                                    | 103                               | <b>4,3</b>               |
| 15 Meses | 13,8                                   | 17,8                                   | 18,4                                    | 14,0                                    | 41,5                              | <b>1,7</b>               |
| 18 Meses | 15,5                                   | 16,5                                   | 16,0                                    | 11,1                                    | 38,7                              | <b>1,6</b>               |
| 21 Meses | 0,8                                    | 0,9                                    | 0,8                                     | ---                                     | 1,1                               | <b>0,05</b>              |
| 24 Meses | ---                                    | ---                                    | ---                                     | ---                                     | 0                                 | <b>0</b>                 |

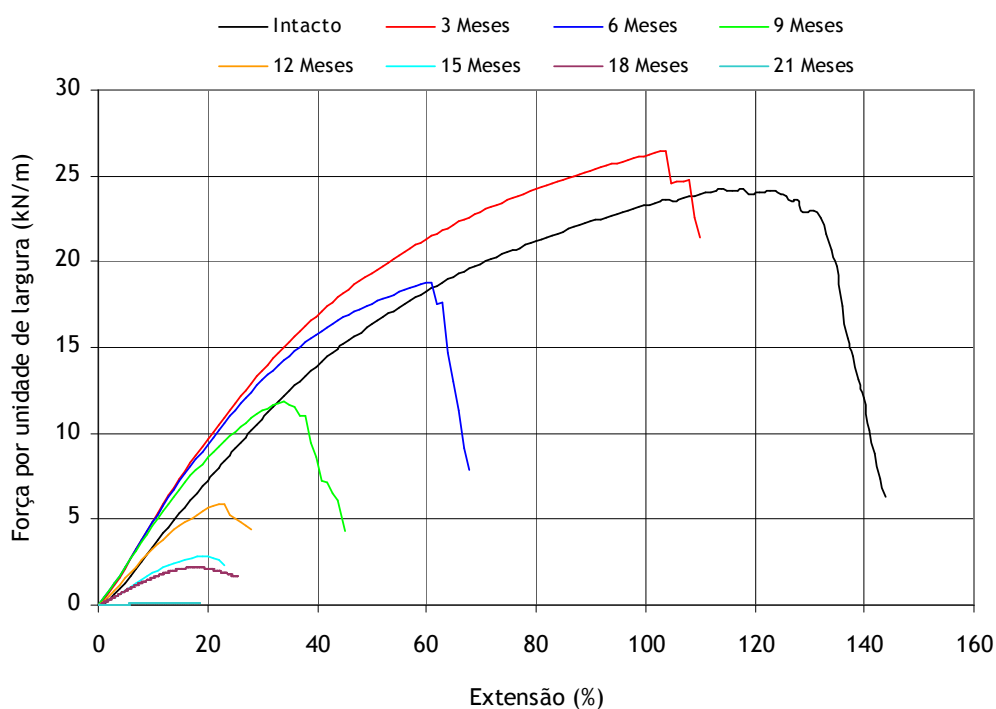


Figura 10.26 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A robustez do geotêxtil B0-500 também diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos reais. Após os primeiros 6 meses de exposição, a robustez residual do material era de apenas 34,3%. Ao fim de 12 e 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 apresentava valores extremamente baixos de robustez (robustez residual de 4,3% e de 1,6%, respectivamente).

A exposição durante 3, 6 e 9 meses aos agentes climáticos causou um aumento da rigidez secante do geotêxtil B0-500. Por sua vez, os valores da rigidez secante dos provetes expostos durante 15, 18 e 21 meses foram inferiores aos valores de referência.

A evolução da resistência à tracção do geotêxtil B0-500 foi semelhante à evolução da resistência à tracção do geotêxtil B0-280. No entanto, e apesar dos materiais serem constituídos pelo mesmo tipo de fibras, a resistência residual do geotêxtil B0-500 foi, para o mesmo período de exposição, sempre superior à resistência residual do geotêxtil B0-280. A maior resistência do geotêxtil B0-500 pode ser explicada pelo facto deste material ser mais espesso e possuir maior massa por unidade de área.

A degradação dos geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos ocorre essencialmente na parte superior dos materiais (parte directamente exposta); a parte inferior está protegida da acção dos agentes climáticos, quer pelas fibras superiores (que impedem que a radiação solar atinja as fibras localizadas mais abaixo), quer pela acumulação de sujidade (a sujidade acumula-se em maior quantidade na parte inferior dos geotêxteis, impedindo, deste modo, que a radiação solar atinja as fibras localizadas nesta zona) (os próprios resíduos resultantes da degradação das fibras superiores podem acumular-se entre as restantes fibras do material, protegendo-as assim da acção da radiação solar). À medida que as fibras superiores vão sendo degradadas (e removidas do material - quer pela acção do vento, quer pela acção da chuva), as fibras situadas logo abaixo vão sofrer a acção directa dos agentes climáticos. Assim, um geotêxtil mais espesso e com maior massa por unidade de área irá apresentar uma maior resistência aos agentes climáticos (o que explica a maior resistência do geotêxtil B0-500 comparativamente ao geotêxtil B0-280).

#### 10.4.4.6 - Geotêxtil B2-500

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos, podem ser encontrados no Quadro 10.20. O Quadro 10.21 resume os valores obtidos para a rigidez secante, para a robustez e para a robustez residual. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes em causa, estão ilustradas na Figura 10.27.

Quadro 10.20 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 25,8 (11%)                                  | 135 (8,0%)                   | ---                      |
| 6 Meses  | 23,6 (9,1%)                                 | 86,3 (11%)                   | <b>91,5</b>              |
| 12 Meses | 18,4 (8,7%)                                 | 54,3 (4,4%)                  | <b>71,3</b>              |
| 18 Meses | 16,1 (7,7%)                                 | 55,3 (5,6%)                  | <b>62,4</b>              |
| 24 Meses | 13,5 (8,5%)                                 | 31,0 (6,6%)                  | <b>52,3</b>              |
| 30 Meses | 14,1 (12%)                                  | 38,9 (7,0%)                  | <b>54,6</b>              |
| 36 Meses | 12,0 (15%)                                  | 28,6 (5,0%)                  | <b>46,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.21 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC}$ 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 20%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 15,8                                  | 29,4                                  | 36,8                                   | 38,9                                   | 2450                              | ---                      |
| 6 Meses  | 47,0                                  | 50,7                                  | 53,3                                   | 51,7                                   | 1258                              | 51,4                     |
| 12 Meses | 54,4                                  | 56,2                                  | 56,5                                   | 52,1                                   | 633                               | 25,8                     |
| 18 Meses | 43,5                                  | 42,8                                  | 44,8                                   | 42,8                                   | 568                               | 23,2                     |
| 24 Meses | 55,7                                  | 58,1                                  | 57,1                                   | 51,3                                   | 262                               | 10,7                     |
| 30 Meses | 62,3                                  | 57,4                                  | 53,6                                   | 47,3                                   | 368                               | 15,0                     |
| 36 Meses | 69,7                                  | 63,5                                  | 57,9                                   | 49,6                                   | 244                               | 10,0                     |

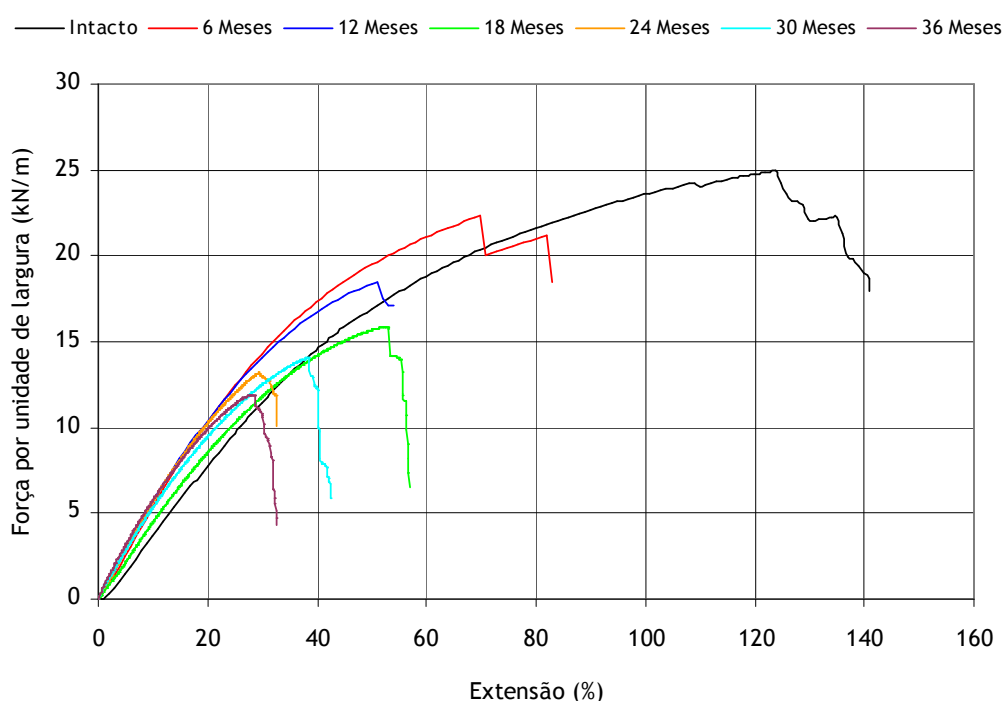


Figura 10.27 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A resistência à tracção e a extensão na força máxima do geotêxtil B2-500 diminuíram à medida que o tempo de exposição aos agentes climáticos aumentou. De facto, o material possuía resistências residuais de 71,3%, 52,3% e 46,5% após 12, 24 e 36 meses de exposição, respectivamente; de um modo idêntico, a extensão na força máxima diminuiu de 135% (extensão original) para 54,3%, 31,0% e 28,6% ao fim de 12, 24 e 36 meses de exposição, respectivamente.

De um modo geral, a robustez do geotêxtil B2-500 também sofreu uma diminuição com o aumento do tempo de exposição aos agentes em causa (robustez residual de 25,8%, 10,7% e 10,0% após 12, 24 e 36 meses, respectivamente). Os valores da rigidez secante dos provetes expostos foram bastante superiores aos valores da rigidez secante dos provetes de referência.

Tal como o geotêxtil B2-280, o geotêxtil B2-500 também não apresentava danos visíveis depois dos diferentes períodos de exposição aos agentes climáticos reais. As diminuições da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da robustez demonstram a existência de danos no geotêxtil B2-500, confirmando os indícios de degradação anteriormente encontrados durante a caracterização física do material (determinação da massa por unidade de área e da espessura).

À semelhança do observado para os geotêxteis B0-280 e B0-500, a resistência residual do geotêxtil B2-500 também foi sempre superior à resistência residual do geotêxtil B2-280 (comparando provetes expostos durante o mesmo intervalo de tempo). De facto, após 12 meses de exposição, a resistência residual do geotêxtil B2-280 era de 50,5%, enquanto que a resistência residual do geotêxtil B2-500 era de 71,3%. Do mesmo modo, aos 36 meses de exposição, os geotêxteis B2-280 e B2-500 tinham resistências residuais de 18,4% e de 46,5%, respectivamente. A comparação dos resultados obtidos para os geotêxteis B2-280 e B2-500 confirma que os materiais com maior massa por unidade de área (e com maior espessura) possuem uma maior resistência à degradação provocada pela exposição aos agentes climáticos.

#### 10.4.4.7 - Geotêxtil B4-500

O Quadro 10.22 resume os valores da resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se resumidos no Quadro 10.23. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e depois da exposição aos agentes climáticos, estão ilustradas na Figura 10.28.

Quadro 10.22 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 26,4 (5,6%)                                 | 140 (5,7%)                   | ---                      |
| 6 Meses  | 24,9 (6,3%)                                 | 91,4 (9,6%)                  | <b>94,3</b>              |
| 12 Meses | 22,5 (6,9%)                                 | 60,9 (3,2%)                  | <b>85,2</b>              |
| 18 Meses | 18,2 (8,6%)                                 | 64,8 (4,0%)                  | <b>68,6</b>              |
| 24 Meses | 18,0 (9,1%)                                 | 47,6 (4,4%)                  | <b>68,2</b>              |
| 30 Meses | 18,9 (6,8%)                                 | 49,9 (2,9%)                  | <b>71,6</b>              |
| 36 Meses | 16,3 (14%)                                  | 39,0 (4,4%)                  | <b>61,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção do geotêxtil B4-500 diminuiu após a exposição aos agentes climáticos reais (diminuição menor que a diminuição ocorrida para os geotêxteis B2-500 e B4-280). Aos 36 meses de exposição, o material ainda apresentava uma resistência residual relativamente elevada (61,7%). A extensão na força máxima também diminuiu ao longo da exposição aos agentes em causa. De facto, ao fim de 12, 24 e 36 meses de exposição, o geotêxtil B4-500 possuía extensões na força máxima de 60,9%, 47,6% e 39,0%, respectivamente (extensão original de 140%).



Quadro 10.23 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 20\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|--|--|---|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 17,3                                   | 30,6                                   | 36,7                                    | 38,3                                    | 2595                              | ---                      |
| 6 Meses  | 44,5                                   | 50,2                                   | 54,6                                    | 53,0                                    | 1455                              | <b>56,1</b>              |
| 12 Meses | 61,2                                   | 67,1                                   | 65,9                                    | 60,6                                    | 938                               | <b>36,2</b>              |
| 18 Meses | 51,5                                   | 48,5                                   | 48,7                                    | 45,4                                    | 790                               | <b>30,4</b>              |
| 24 Meses | 67,2                                   | 65,4                                   | 62,0                                    | 55,0                                    | 532                               | <b>20,5</b>              |
| 30 Meses | 87,3                                   | 74,1                                   | 66,5                                    | 57,4                                    | 622                               | <b>24,0</b>              |
| 36 Meses | 76,1                                   | 69,0                                   | 63,2                                    | 55,4                                    | 419                               | <b>16,2</b>              |

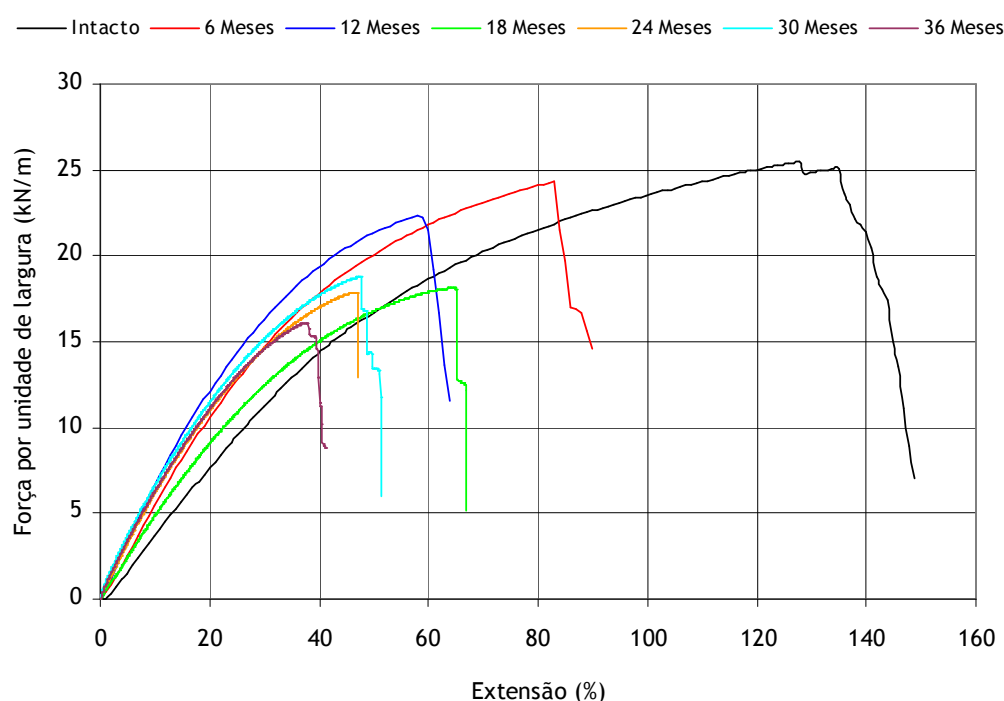


Figura 10.28 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

De um modo geral, a robustez do geotêxtil B4-500 diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais. Os valores da rigidez secante dos provetes expostos foram bastante superiores aos valores da rigidez secante dos provetes de referência (a exposição ao clima provocou um aumento da rigidez dos materiais).

Tal como para o geotêxtil B4-280, a inspeção visual e a caracterização física (massa por unidade de área e espessura) do geotêxtil B4-500 também não indicaram a existência de danos no material. No entanto, as diminuições observadas nas propriedades mecânicas (resistência à tracção, extensão na força máxima e robustez) do geotêxtil B4-500 mostraram a ocorrência de alguma degradação neste material. A maior resistência do geotêxtil B4-500 em relação ao geotêxtil B4-280 indica, mais uma vez, que os materiais com maior massa por unidade de área (e com maior espessura) possuem maior resistência aos agentes climáticos.

**10.4.4.8 - Geotêxtil P2-500**

As propriedades mecânicas do geotêxtil P2-500, determinadas antes e após a exposição aos agentes climáticos, estão resumidas no Quadro 10.24 e no Quadro 10.25. As curvas médias força-extensão encontram-se representadas na Figura 10.29.

Quadro 10.24 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 25,6 (7,1%)                                  | 117 (6,1%)                   | ---                      |
| 6 Meses  | 25,9 (11%)                                   | 93,4 (7,8%)                  | <b>101</b>               |
| 12 Meses | 20,8 (5,5%)                                  | 50,6 (8,6%)                  | <b>81,2</b>              |
| 18 Meses | 17,1 (20%)                                   | 50,5 (9,7%)                  | <b>66,8</b>              |
| 24 Meses | 17,9 (7,8%)                                  | 36,8 (4,4%)                  | <b>69,9</b>              |
| 30 Meses | 14,6 (15%)                                   | 37,0 (3,5%)                  | <b>57,0</b>              |
| 36 Meses | 15,8 (15%)                                   | 30,2 (5,3%)                  | <b>61,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.25 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{\text{SEC}} 2\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez<br>( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|----------|--|--|---|---|------------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 16,7   | 29,8   | 37,1  | 39,4  | 1979                               | ---                   |
| 6 Meses  | 43,0   | 47,2   | 51,5  | 51,1  | 1508                               | <b>76,2</b>           |
| 12 Meses | 52,6   | 57,2   | 60,4  | 57,8  | 689                                | <b>34,8</b>           |
| 18 Meses | 35,3   | 39,7   | 45,1  | 44,8  | 498                                | <b>25,2</b>           |
| 24 Meses | 54,7   | 63,7   | 66,1  | 61,0  | 412                                | <b>20,8</b>           |
| 30 Meses | 42,5   | 47,7   | 50,3  | 48,3  | 330                                | <b>16,7</b>           |
| 36 Meses | 72,6   | 72,0   | 69,5  | 61,9  | 312                                | <b>15,8</b>           |

Tal como para todos os geotêxteis anteriores, a resistência à tracção do geotêxtil P2-500 também diminuiu com a exposição aos agentes climáticos (excepção após 6 meses de exposição: 101% de resistência residual). Aos 12, 24 e 36 meses de exposição, o geotêxtil P2-500 possuía resistências residuais de 81,2%, de 69,9% e de 61,7%, respectivamente. A extensão na força máxima do material também diminuiu após a exposição prolongada ao ar livre.

A robustez do geotêxtil P2-500 diminuiu à medida que aumentou o tempo de exposição aos agentes climáticos (robustez residual de 34,8%, de 20,8% e de 15,8% após 12, 24 e 36 meses de exposição, respectivamente). A rigidez secante aumentou depois da exposição aos agentes climáticos.

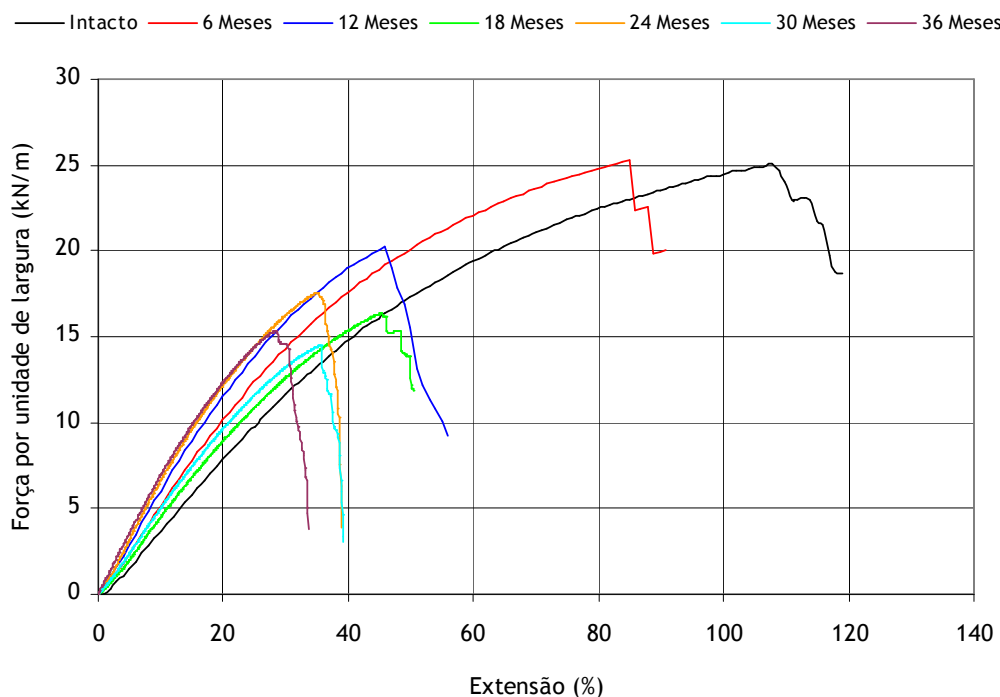


Figura 10.29 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A inspeção visual e a caracterização física (massa por unidade de área e espessura) não indicaram a ocorrência de degradação no geotêxtil P2-500. No entanto, a diminuição da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da robustez mostram a existência de danos no material.

A comparação dos resultados entre os geotêxteis produzidos a partir do mesmo tipo de fibras, mas com diferentes massas por unidade de área, mostrou que os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  possuem uma maior resistência aos agentes climáticos reais do que os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ . No entanto, a variação ocorrida nos valores da resistência residual e da robustez residual dos geotêxteis P2-280 e P2-500 não obedeceu a esta tendência (a exposição durante 2000 horas e 4000 horas no QUV causou resultados idênticos - ponto 9.3.2.5, Capítulo 9). A resistência residual do geotêxtil P2-280 foi quase sempre superior à resistência residual do geotêxtil P2-500 (excepção aos 24 e 36 meses); a robustez residual do geotêxtil P2-280 foi maior que a robustez residual do geotêxtil P2-500 (excepção após 6 meses de exposição).

#### 10.4.4.9 - Comparação da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais

A resistência à tracção dos vários geotêxteis de PP diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais. No entanto, essa diminuição foi distinta para os diversos geotêxteis, dependendo das características físicas (massa por unidade de área e/ou espessura) e da composição química dos materiais. A Figura 10.30 compara a evolução da resistência residual dos materiais com uma massa por unidade de área de  $280 \text{ g.m}^{-2}$  (B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280) durante a exposição aos agentes climáticos reais. Do mesmo modo, a Figura 10.31 compara a evolução da resistência residual dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de  $500 \text{ g.m}^{-2}$  (B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500).

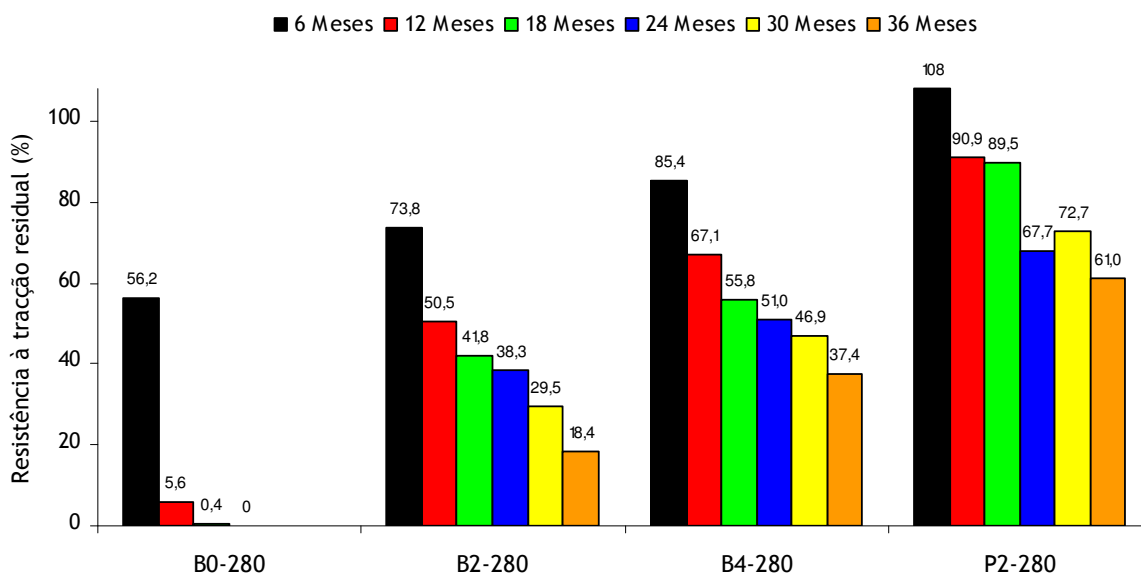


Figura 10.30 - Evolução da resistência à tracção residual dos geotêxteis B0-280, B2-280, B4-280 e P2-280 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

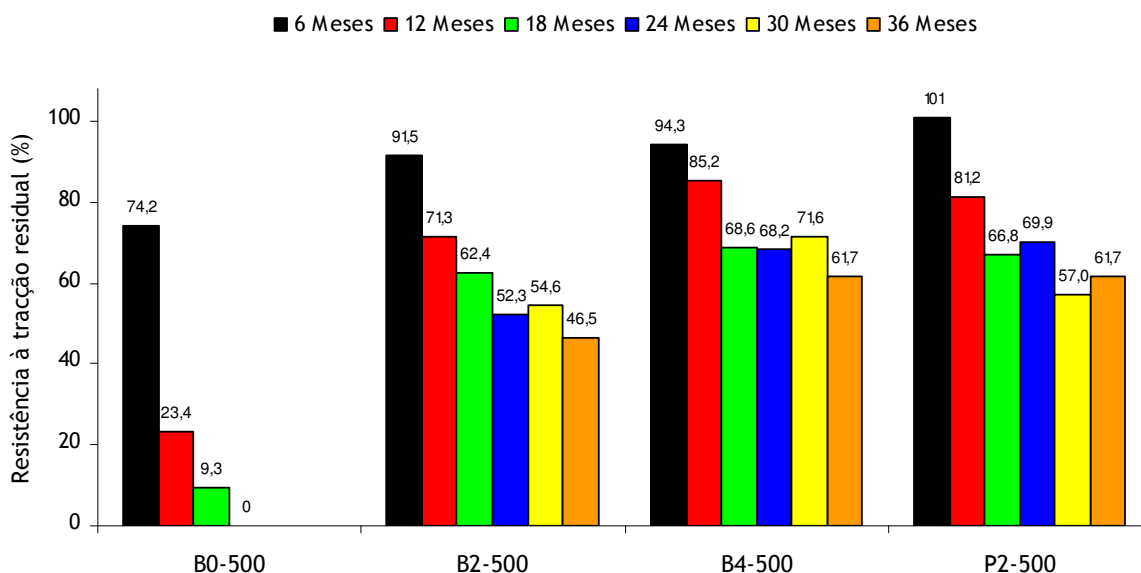


Figura 10.31 - Evolução da resistência à tracção residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

A diminuição da resistência à tracção foi mais pronunciada nos dois geotêxteis sem C944 (B0-280 e B0-500) (materiais totalmente destruídos após 21 e 24 meses de exposição aos agentes climáticos, respectivamente). A degradação completa dos geotêxteis não estabilizados e a degradação apenas parcial dos geotêxteis estabilizados mostra a grande importância dos aditivos químicos na protecção dos materiais contra a degradação causada pelos agentes climáticos. De facto, após 24 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 apresentava uma resistência residual nula, ao passo que os geotêxteis B2-280, B4-280 e P2-280 possuíam resistências residuais de 38,3%, 51,0% e 67,7%, respectivamente. Do mesmo modo, aos 24 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 tinha uma resistência residual nula, enquanto que os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 possuíam resistências residuais de 52,3%, 68,2% e 69,9%, respectivamente.

A presença de uma pequena quantidade (0,2%) de C944 nas fibras de PP retardou significativamente a degradação ocorrida nos geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos reais. De facto, a resistência dos geotêxteis com 0,2% de C944 foi muito maior que a resistência dos geotêxteis sem C944. As resistências residuais dos geotêxteis com 0,4% de C944 (B4-280 e B4-500) foram superiores às resistências residuais dos geotêxteis com 0,2% de C944 (B2-280 e B2-500) (comparando materiais com massas por unidade de área idênticas e expostos durante o mesmo intervalo de tempo). Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP originou um aumento significativo da resistência dos geotêxteis contra a degradação causada pelos agentes climáticos.

A presença de negro de carbono nas fibras de PP resultou numa protecção adicional dos geotêxteis contra a acção dos agentes climáticos. De facto, após 36 meses de exposição, o geotêxtil P2-280 possuía uma resistência residual de 61,0%, enquanto que o geotêxtil B2-280 tinha uma resistência residual de apenas 18,4% (a principal diferença entre os dois materiais é a presença ou não de negro de carbono). Do mesmo modo, no fim dos 36 meses de exposição, os geotêxteis P2-500 e B2-500 apresentavam resistências residuais de 61,7% e de 46,5%, respectivamente.

A evolução relativa das resistências residuais dos geotêxteis com uma massa por unidade da área de 280 g.m<sup>-2</sup> foi muito idêntica à evolução das resistências residuais dos geotêxteis com uma massa por unidade de área de 500 g.m<sup>-2</sup>. No entanto, e com excepção já anteriormente referida dos geotêxteis P2-280 e P2-500, os materiais com maior massa por unidade de área apresentaram maior resistência aos agentes climáticos reais (comparando materiais produzidos com o mesmo tipo de fibras).

#### 10.4.5 - Ensaio de rasgamento

Os ensaios de rasgamento foram apenas realizados para os geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> após 6, 12, 18 e 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais. As resistências ao rasgamento dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500, determinadas antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos, encontram-se nos Quadros 10.26, 10.27, 10.28 e 10.29, respectivamente.

Quadro 10.26 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao rasgamento<br>(N) | Resistência residual<br>(%) |
|----------|----------------------------------|-----------------------------|
| Intacto  | 615 (16%)                        | ---                         |
| 6 Meses  | 310 (15%)                        | <b>50,4</b>                 |
| 12 Meses | 152 (44%)                        | <b>24,7</b>                 |
| 18 Meses | 55 (49%)                         | <b>8,9</b>                  |
| 24 Meses | 0                                | <b>0</b>                    |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência ao rasgamento dos geotêxteis sofreu uma grande diminuição após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos. Aos 6 meses de exposição, a resistência ao rasgamento estava reduzida para cerca de metade do seu valor original (resistências ao rasgamento residuais de 50,4%, 51,6%, 54,5% e 53,3% para os geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500, respectivamente).

Quadro 10.27 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao rasgamento<br>(N) | Resistência residual<br>(%) |
|----------|----------------------------------|-----------------------------|
| Intacto  | 630 (16%)                        | ---                         |
| 6 Meses  | 325 (11%)                        | <b>51,6</b>                 |
| 12 Meses | 246 (17%)                        | <b>39,0</b>                 |
| 18 Meses | 226 (17%)                        | <b>35,9</b>                 |
| 24 Meses | 199 (14%)                        | <b>31,6</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.28 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao rasgamento<br>(N) | Resistência residual<br>(%) |
|----------|----------------------------------|-----------------------------|
| Intacto  | 637 (12%)                        | ---                         |
| 6 Meses  | 347 (14%)                        | <b>54,5</b>                 |
| 12 Meses | 282 (11%)                        | <b>44,3</b>                 |
| 18 Meses | 269 (13%)                        | <b>42,2</b>                 |
| 24 Meses | 228 (6,7%)                       | <b>35,8</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.29 - Resistência ao rasgamento e resistência ao rasgamento residual do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao rasgamento<br>(N) | Resistência residual<br>(%) |
|----------|----------------------------------|-----------------------------|
| Intacto  | 572 (15%)                        | ---                         |
| 6 Meses  | 305 (15%)                        | <b>53,3</b>                 |
| 12 Meses | 223 (17%)                        | <b>39,0</b>                 |
| 18 Meses | 232 (15%)                        | <b>40,6</b>                 |
| 24 Meses | 202 (16%)                        | <b>35,3</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A diminuição ocorrida na resistência ao rasgamento ao fim de 6 meses de exposição foi semelhante para todos os geotêxteis (independentemente da composição química dos materiais). A diminuição da resistência ao rasgamento, após 6 meses de exposição, foi maior que a diminuição da resistência à tracção (e maior que a diminuição da resistência ao punçoamento estático, como se verá no ponto 10.4.6.).

O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais originou uma diminuição adicional da resistência ao rasgamento dos geotêxteis (diminuição distinta para os diferentes materiais). Ao fim de 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência ao rasgamento residual de 8,9%, enquanto que os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 apresentavam resistências residuais de 35,9%, 42,2% e 40,6%, respectivamente.

Aos 24 meses de exposição, a resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500 era nula, ao passo que os restantes geotêxteis apresentavam resistências ao rasgamento residuais superiores a 30%: 31,6%, 35,8% e 35,3% para os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500, respectivamente. A Figura 10.32 compara a evolução da resistência ao rasgamento residual dos diferentes geotêxteis durante a exposição aos agentes climáticos reais.

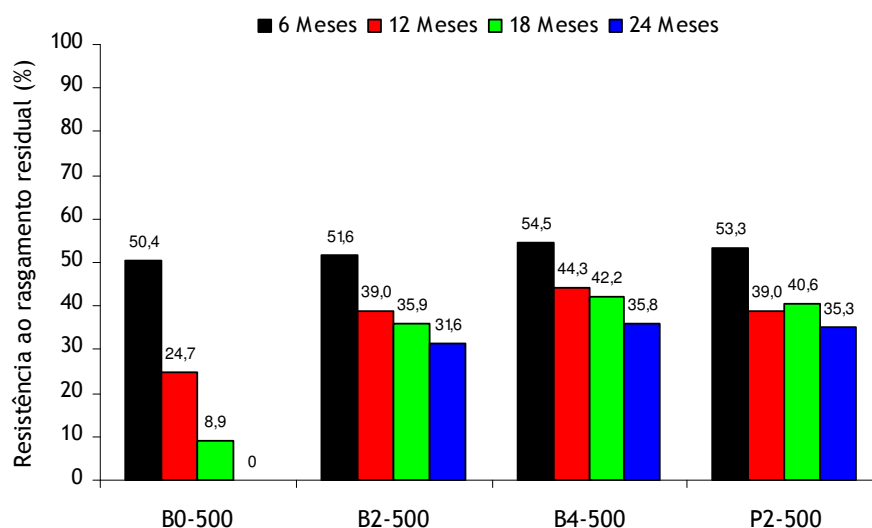


Figura 10.32 - Evolução da resistência ao rasgamento residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

A resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B4-500 foi ligeiramente superior à resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B2-500, para todos os tempos de exposição. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa maior protecção dos geotêxteis contra a acção dos agentes climáticos reais (os resultados dos ensaios de tracção e dos ensaios de caracterização física levaram à mesma conclusão).

A comparação entre os geotêxteis B2-500 e P2-500 (a principal diferença entre os dois materiais é a presença ou não de negro de carbono) mostra que a resistência ao rasgamento residual do geotêxtil P2-500 foi sempre igual ou superior à resistência ao rasgamento residual do geotêxtil B2-500. Assim, a presença de negro de carbono nas fibras de PP proporciona uma protecção adicional aos materiais contra a acção dos agentes climáticos (o efeito do negro de carbono foi muito mais evidente nos resultados obtidos nos ensaios de tracção-extensão e nos ensaios de punçoamento estático).

#### 10.4.6 - Ensaios de punçoamento estático

À semelhança dos ensaios de rasgamento, os ensaios de punçoamento estático também só foram realizados para os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  após 6, 12, 18 e 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais. Os valores obtidos para a resistência ao punçoamento estático, deslocamento na força máxima e resistência ao punçoamento estático residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos, encontram-se resumidos nos Quadros 10.30, 10.31, 10.32 e 10.33, respectivamente.

Quadro 10.30 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao punção (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) | Resistência residual (%) |
|----------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 2,59 (10%)                 | 70,2 (3,7%)                       | ---                      |
| 6 Meses  | 2,00 (13%)                 | 51,0 (3,4%)                       | <b>77,2</b>              |
| 12 Meses | 0,52 (19%)                 | 43,0 (2,6%)                       | <b>20,1</b>              |
| 18 Meses | 0,10 (32%)                 | 44,2 (5,2%)                       | <b>3,9</b>               |
| 24 Meses | 0                          | ---                               | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.31 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao punção (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) | Resistência residual (%) |
|----------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 2,69 (12%)                 | 68,1 (2,8%)                       | ---                      |
| 6 Meses  | 2,29 (11%)                 | 55,2 (4,9%)                       | <b>85,1</b>              |
| 12 Meses | 1,64 (8,9%)                | 51,1 (4,1%)                       | <b>61,0</b>              |
| 18 Meses | 1,11 (9,4%)                | 51,2 (4,9%)                       | <b>41,3</b>              |
| 24 Meses | 1,09 (12%)                 | 50,7 (1,4%)                       | <b>40,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.32 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao punção (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) | Resistência residual (%) |
|----------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 2,61 (5,1%)                | 67,9 (2,8%)                       | ---                      |
| 6 Meses  | 2,48 (4,4%)                | 55,7 (1,4%)                       | <b>95,0</b>              |
| 12 Meses | 1,96 (5,2%)                | 51,9 (2,7%)                       | <b>75,1</b>              |
| 18 Meses | 1,90 (9,8%)                | 50,9 (3,2%)                       | <b>72,8</b>              |
| 24 Meses | 1,56 (9,9%)                | 47,8 (4,2%)                       | <b>59,8</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 10.33 - Resultados dos ensaios de punção estático do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência ao punção (kN) | Deslocamento na força máxima (mm) | Resistência residual (%) |
|----------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 2,51 (16%)                 | 63,3 (2,4%)                       | ---                      |
| 6 Meses  | 2,42 (6,3%)                | 52,7 (1,8%)                       | <b>96,4</b>              |
| 12 Meses | 1,90 (5,9%)                | 47,5 (0,7%)                       | <b>75,7</b>              |
| 18 Meses | 1,89 (11%)                 | 45,8 (5,1%)                       | <b>75,3</b>              |
| 24 Meses | 1,68 (9,2%)                | 45,4 (4,3%)                       | <b>66,9</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



A resistência ao punçoamento estático dos geotêxteis também sofreu uma redução após a exposição aos agentes climáticos reais (tal como a resistência à tracção e a resistência ao rasgamento). No entanto, a diminuição ocorrida na resistência ao punçoamento estático não foi igual para todos os materiais. De facto, ao fim de 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía uma resistência ao punçoamento estático residual (20,1%) muito menor que a dos outros geotêxteis (61,0%, 75,1% e 75,7% para os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500, respectivamente). Aos 18 meses de exposição, a resistência ao punçoamento estático residual do geotêxtil B0-500 era de apenas 3,9%, indicando a existência de sérios danos na estrutura do material. Após 24 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 estava destruído, enquanto que os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 apresentavam resistências ao punçoamento estático residuais de 40,5%, 59,8% e 66,9%, respectivamente. A Figura 10.33 compara as resistências ao punçoamento estático residuais dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

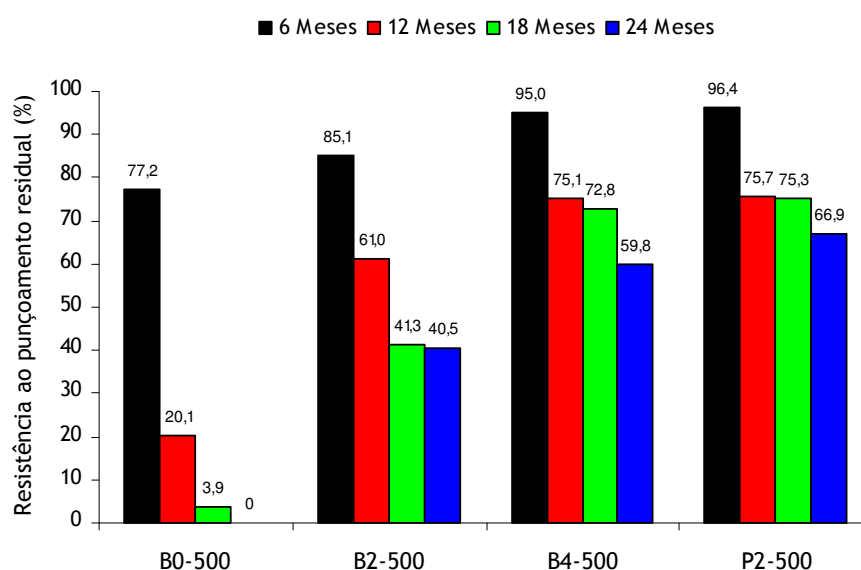


Figura 10.33 - Evolução da resistência ao punçoamento estático residual dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

A diminuição ocorrida na resistência ao punçoamento estático foi muito maior no geotêxtil B0-500 do que nos restantes geotêxteis. Assim, a incorporação de aditivos químicos nas fibras de PP causou um aumento significativo da resistência dos materiais aos agentes climáticos. A resistência ao punçoamento estático residual do geotêxtil B4-500 foi maior que a do geotêxtil B2-500 (comparando provetes após o mesmo intervalo de exposição), indicando, mais uma vez, que a presença de uma maior quantidade de C944 originou uma melhor protecção dos materiais contra a acção dos agentes climáticos.

A diminuição da resistência ao punçoamento estático foi menor para o geotêxtil P2-500 do que para o geotêxtil B2-500 (resistências ao punçoamento estático residuais de 40,5% para o geotêxtil B2-500 e de 66,9% para o geotêxtil P2-500, após 24 meses de exposição aos agentes climáticos). Estes resultados mostram, mais uma vez, que pode ser alcançada uma protecção adicional dos geotêxteis de PP contra a degradação provocada pelos agentes climáticos através da incorporação de negro de carbono na composição química dos materiais.

O deslocamento na força máxima dos geotêxteis diminuiu com a exposição aos agentes climáticos reais. A maior diminuição no deslocamento na força máxima dos materiais ocorreu após os primeiros 6 meses de exposição. De um modo geral, o aumento do tempo de exposição provocou uma redução adicional do deslocamento na força máxima dos geotêxteis (reduções menores que as observadas ao fim dos primeiros 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais).

#### 10.4.7 - Determinação da permeabilidade à água normal ao plano

##### 10.4.7.1 - Geotêxtil B0-500

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B0-500 obtidas para as perdas de carga hidráulica,  $H$ , de 70, 56, 42, 28 e de 14 mm, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, podem ser encontradas no Quadro 10.34. As curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  obtidas para o geotêxtil B0-500, antes e depois da exposição aos agentes climáticos reais, estão ilustradas na Figura 10.34.

Quadro 10.34 - Velocidades de escoamento  $v_{20}$  H70,  $v_{20}$  H56,  $v_{20}$  H42,  $v_{20}$  H28 e  $v_{20}$  H14 do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H70<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H56<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H42<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H28<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H14<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Intacto  | 53,9 (11%)                            | 45,1 (11%)                            | 35,3 (11%)                            | 24,9 (13%)                            | 12,7 (13%)                            |
| 6 Meses  | 48,9 (26%)                            | 38,7 (27%)                            | 29,9 (28%)                            | 20,0 (29%)                            | 10,1 (33%)                            |
| 12 Meses | 54,4 (18%)                            | 43,0 (17%)                            | 31,8 (16%)                            | 21,5 (15%)                            | 9,6 (15%)                             |
| 18 Meses | 91,5 (41%)                            | 72,0 (41%)                            | 55,6 (44%)                            | 36,9 (53%)                            | 19,4 (55%)                            |
| 21 Meses | 161 (30%)                             | 134 (30%)                             | 109 (35%)                             | 79,5 (39%)                            | 45,7 (41%)                            |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

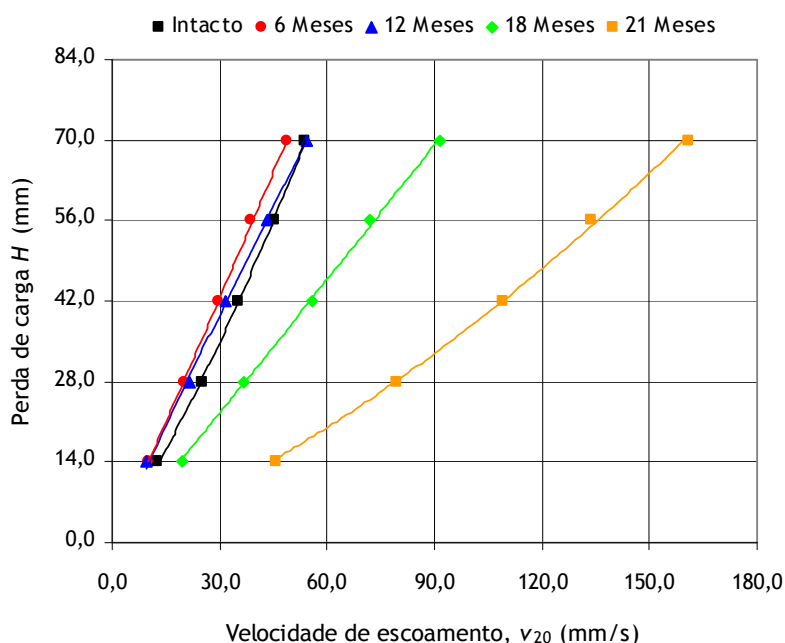


Figura 10.34 - Curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

As  $v_{20}$  H50 médias e as permissividades médias para uma perda de carga de 50 mm ( $\Psi$  H50), obtidas antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos, estão resumidas no Quadro 10.35.

Quadro 10.35 -  $v_{20}$  H50 médias e  $\Psi$  H50 médias do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H50*<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $\Psi$ H50<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|----------|--|----------------------------------|
| Intacto  | 40,9 (11%)                             | 0,82 (11%)                       |
| 6 Meses  | 35,1 (27%)                             | 0,70 (27%)                       |
| 12 Meses | 38,2 (16%)                             | 0,76 (16%)                       |
| 18 Meses | 65,3 (44%)                             | 1,3 (44%)                        |
| 21 Meses | 125 (33%)                              | 2,5 (33%)                        |

(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$ )  
(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B0-500 não sofreram alterações muito significativas durante os primeiros 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais. De facto, após 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía uma  $v_{20}$  H50 (38,2 mm.s<sup>-1</sup>) idêntica à  $v_{20}$  H50 original (40,9 mm.s<sup>-1</sup>).

O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos causou um aumento muito significativo das velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B0-500. De facto, ao fim de 21 meses de exposição, o material apresentava uma  $v_{20}$  H50 de 125 mm.s<sup>-1</sup>, cerca do triplo do valor original (40,9 mm.s<sup>-1</sup>) e cerca do dobro da  $v_{20}$  H50 após 18 meses de exposição (65,3 mm.s<sup>-1</sup>).

Assim, as propriedades hidráulicas do geotêxtil B0-500 sofreram uma grande alteração durante a sua exposição aos agentes climáticos reais. Os aumentos ocorridos nas velocidades de escoamento  $v_{20}$  e na permissividade  $\Psi$  podem ser explicados pela elevada degradação sofrida pelo geotêxtil B0-500 durante a exposição aos agentes climáticos (as diminuições ocorridas na espessura e na massa por unidade de área resultaram num aumento das velocidades de escoamento do geotêxtil B0-500).

#### 10.4.7.2 - Geotêxtil B2-500

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B2-500 ( $v_{20}$  H70,  $v_{20}$  H56,  $v_{20}$  H42,  $v_{20}$  H28 e  $v_{20}$  H14), determinadas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, podem ser encontradas no Quadro 10.36. A Figura 10.35 ilustra as curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$ , obtidas antes e após a exposição aos agentes climáticos reais. As  $v_{20}$  H50 médias e as  $\Psi$  H50 médias estão resumidas no Quadro 10.37.

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B2-500 (para as diferentes perdas de carga) sofreram uma diminuição com a exposição aos agentes climáticos. De facto, aos 24 meses de exposição, o geotêxtil B2-500 possuía uma  $v_{20}$  H50 de 18,5 mm.s<sup>-1</sup>, cerca de metade da sua  $v_{20}$  H50 original (39,7 mm.s<sup>-1</sup>).

Quadro 10.36 - Velocidades de escoamento  $v_{20}$  H70,  $v_{20}$  H56,  $v_{20}$  H42,  $v_{20}$  H28 e  $v_{20}$  H14 do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H70<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H56<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H42<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H28<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H14<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Intacto  | 51,1 (9,9%)                           | 43,8 (10%)                            | 34,9 (9,4%)                           | 24,2 (11%)                            | 13,2 (11%)                            |
| 6 Meses  | 33,7 (20%)                            | 27,5 (20%)                            | 21,0 (17%)                            | 14,8 (18%)                            | 7,7 (14%)                             |
| 12 Meses | 44,4 (14%)                            | 36,1 (15%)                            | 27,5 (15%)                            | 18,8 (18%)                            | 10,1 (14%)                            |
| 18 Meses | 34,7 (18%)                            | 28,3 (17%)                            | 21,0 (19%)                            | 14,8 (19%)                            | 7,5 (22%)                             |
| 24 Meses | 25,7 (54%)                            | 20,6 (55%)                            | 15,3 (58%)                            | 10,8 (60%)                            | 5,5 (59%)                             |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

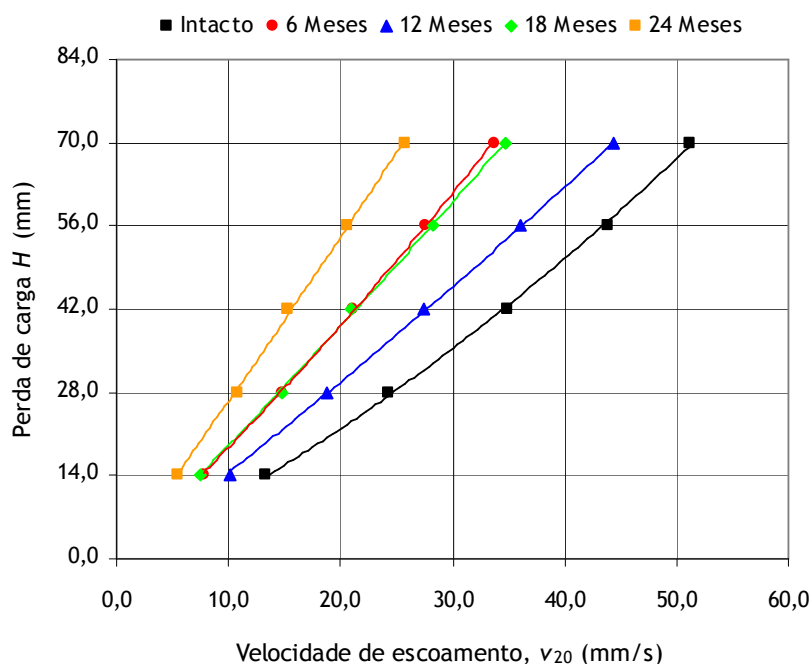


Figura 10.35 - Curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.37 -  $v_{20}$  H50 médias e  $\Psi$  H50 médias do geotêxtil B2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H50*<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $\Psi$ H50<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|----------|--|----------------------------------|
| Intacto  | 39,7 (10%)                             | 0,79 (10%)                       |
| 6 Meses  | 24,9 (19%)                             | 0,50 (19%)                       |
| 12 Meses | 33,0 (13%)                             | 0,66 (13%)                       |
| 18 Meses | 25,6 (18%)                             | 0,51 (18%)                       |
| 24 Meses | 18,5 (56%)                             | 0,37 (56%)                       |

(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$ )  
(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

As diminuições das velocidades de escoamento  $v_{20}$  e da permissividade  $\Psi$  podem ser explicadas pela sujidade existente entre as fibras do geotêxtil B2-500. A sujidade acumulada pode preencher e/ou colmatar os espaços livres existentes entre as fibras dos geotêxteis não-tecidos agulhados e, assim, dificultar, ou mesmo impedir, a passagem da água (o “falso” aumento da massa por unidade de área do geotêxtil B2-500 indicou a existência de sujidade entre as suas fibras). Além disso, e ao contrário do geotêxtil B0-500, a espessura do geotêxtil B2-500 não sofreu uma grande diminuição durante os primeiros 24 meses de exposição ao ar livre (o que a acontecer, provocaria certamente um aumento das velocidades de escoamento  $v_{20}$  e da permissividade  $\Psi$ ).

#### 10.4.7.3 - Geotêxtil B4-500

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B4-500, obtidas antes e após a exposição aos agentes climáticos, estão resumidas no Quadro 10.38. A Figura 10.36 ilustra as curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  obtidas para o geotêxtil B4-500, antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos. As  $v_{20}$  H50 médias e as  $\Psi$  H50 médias encontram-se no Quadro 10.39.

Quadro 10.38 - Velocidades de escoamento  $v_{20}$  H70,  $v_{20}$  H56,  $v_{20}$  H42,  $v_{20}$  H28 e  $v_{20}$  H14 do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H70<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H56<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H42<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H28<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H14<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Intacto  | 51,4 (11%)                            | 42,8 (12%)                            | 33,5 (12%)                            | 23,3 (12%)                            | 12,1 (14%)                            |
| 6 Meses  | 32,3 (14%)                            | 26,7 (16%)                            | 20,5 (15%)                            | 14,4 (15%)                            | 7,6 (20%)                             |
| 12 Meses | 32,6 (9,9%)                           | 26,7 (10%)                            | 20,5 (12%)                            | 13,9 (12%)                            | 7,0 (12%)                             |
| 18 Meses | 27,8 (26%)                            | 22,4 (28%)                            | 16,9 (28%)                            | 11,3 (26%)                            | 6,1 (32%)                             |
| 24 Meses | 28,8 (11%)                            | 23,7 (12%)                            | 18,3 (12%)                            | 12,7 (11%)                            | 6,5 (11%)                             |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

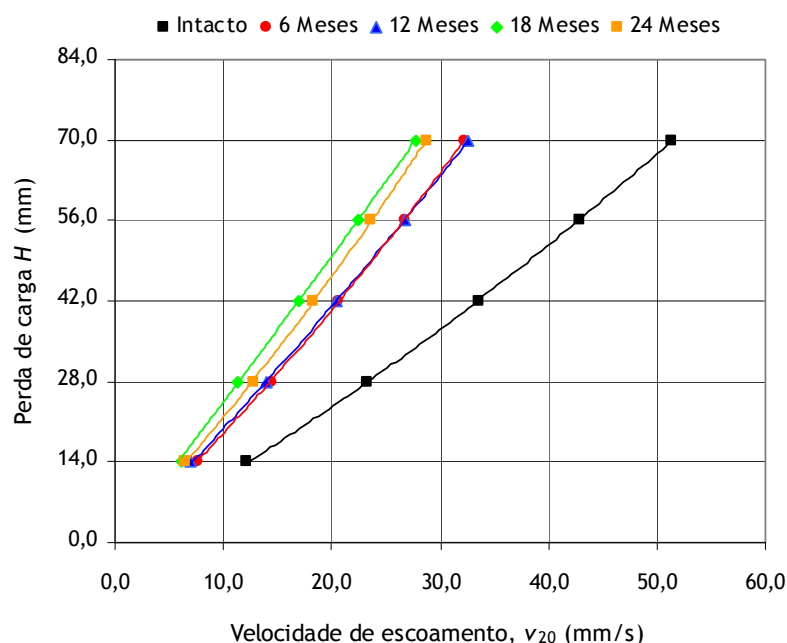


Figura 10.36 - Curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.39 -  $v_{20}$  H50 médias e  $\Psi$  H50 médias do geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H50*<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $\Psi$ H50<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|----------|--|----------------------------------|
| Intacto  | 38,8 (12%)                             | 0,78 (12%)                       |
| 6 Meses  | 24,1 (15%)                             | 0,48 (15%)                       |
| 12 Meses | 24,0 (11%)                             | 0,48 (11%)                       |
| 18 Meses | 20,1 (27%)                             | 0,40 (27%)                       |
| 24 Meses | 21,4 (11%)                             | 0,43 (11%)                       |

(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$   
(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Tal como para o geotêxtil B2-500, a exposição aos agentes climáticos reais também provocou uma diminuição das velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil B4-500 (para todas as perdas de carga). Após os primeiros 6 meses de exposição, o geotêxtil B4-500 possuía uma  $v_{20}$  H50 de 24,1 mm.s<sup>-1</sup> ( $v_{20}$  H50 original de 38,8 mm.s<sup>-1</sup>). O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais não provocou grandes alterações na  $v_{20}$  H50 do geotêxtil B4-500 (ao fim de 24 meses de exposição,  $v_{20}$  H50 de 21,4 mm.s<sup>-1</sup>).

As diminuições ocorridas nas velocidades de escoamento  $v_{20}$  e permissividade  $\Psi$  do geotêxtil B4-500 podem também ser atribuídas à sujidade acumulada nos espaços livres existentes entre as fibras do material (o que dificultou e/ou impediu a passagem da água). Além disso, a espessura do material também não diminuiu durante os 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

#### 10.4.7.4 - Geotêxtil P2-500

As velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil P2-500, determinadas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidas no Quadro 10.40. As curvas de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  estão representadas na Figura 10.37. As  $v_{20}$  H50 médias e as  $\Psi$  H50 médias do geotêxtil P2-500 são apresentadas no Quadro 10.41.

Quadro 10.40 - Velocidades de escoamento  $v_{20}$  H70,  $v_{20}$  H56,  $v_{20}$  H42,  $v_{20}$  H28 e  $v_{20}$  H14 do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H70<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H56<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H42<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H28<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $v_{20}$ H14<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Intacto  | 51,8 (11%)                            | 43,3 (9,7%)                           | 33,9 (8,9%)                           | 23,9 (13%)                            | 12,4 (8,9%)                           |
| 6 Meses  | 26,9 (24%)                            | 22,2 (22%)                            | 17,6 (23%)                            | 12,3 (24%)                            | 6,7 (28%)                             |
| 12 Meses | 35,4 (22%)                            | 28,7 (22%)                            | 22,2 (23%)                            | 15,3 (24%)                            | 7,9 (24%)                             |
| 18 Meses | 41,2 (26%)                            | 33,5 (26%)                            | 25,7 (26%)                            | 17,8 (26%)                            | 8,8 (23%)                             |
| 24 Meses | 32,9 (28%)                            | 26,5 (27%)                            | 20,0 (27%)                            | 13,4 (27%)                            | 7,0 (30%)                             |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

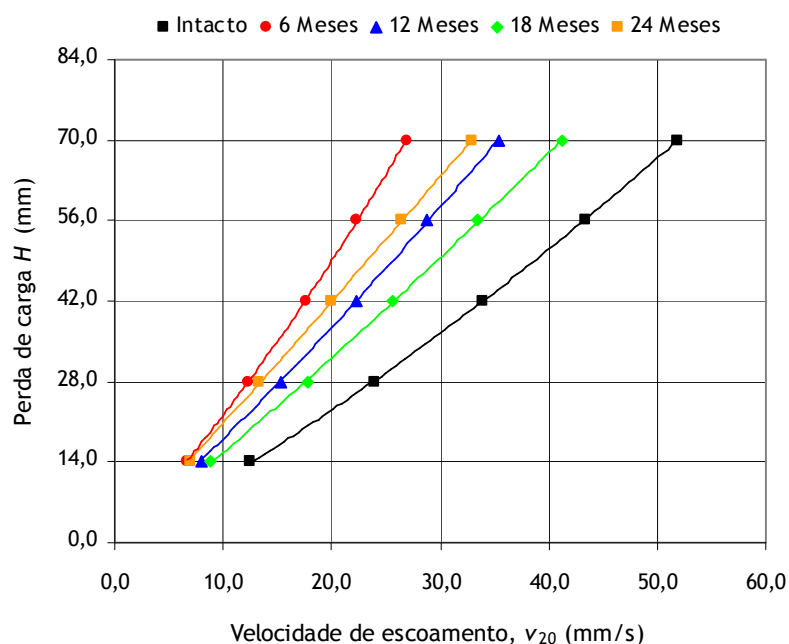


Figura 10.37 - Curvas médias de regressão quadrática  $H = f(v_{20})$  do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 10.41 -  $v_{20}$  H50 médias e  $\Psi$  H50 médias do geotêxtil P2-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $v_{20}$ H50*<br>(mm.s <sup>-1</sup> ) | $\Psi$ H50<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|----------|--|----------------------------------|
| Intacto  | 39,4 (10%)                             | 0,79 (10%)                       |
| 6 Meses  | 20,3 (24%)                             | 0,41 (24%)                       |
| 12 Meses | 26,1 (23%)                             | 0,52 (23%)                       |
| 18 Meses | 30,2 (26%)                             | 0,60 (26%)                       |
| 24 Meses | 23,7 (27%)                             | 0,47 (27%)                       |

(\*valores determinados a partir da expressão quadrática:  $H = a(v_{20}) + b(v_{20})^2$   
(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Tal como para os geotêxteis B2-500 e B4-500, as velocidades de escoamento  $v_{20}$  do geotêxtil P2-500 também sofreram uma diminuição após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos. De facto, ao fim de 24 meses de exposição, o geotêxtil P2-500 possuía uma  $v_{20}$  H50 de 23,7 mm.s<sup>-1</sup> ( $v_{20}$  H50 original de 39,4 mm.s<sup>-1</sup>).

As diminuições ocorridas nas velocidades de escoamento  $v_{20}$  e na permissividade  $\Psi$  podem também ser explicadas pela acumulação de sujidade entre as fibras do geotêxtil P2-500.

#### 10.4.7.5 - Comparação das $v_{20}$ H50 dos geotêxteis após a exposição aos agentes climáticos

As  $v_{20}$  H50 dos geotêxteis não-tecidos agulhados de PP sofreram alterações significativas depois dos vários períodos de exposição aos agentes climáticos reais. No entanto, as alterações observadas não foram iguais para todos os geotêxteis (dependendo da composição química dos materiais). A Figura 10.38 compara a evolução da  $v_{20}$  H50 dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

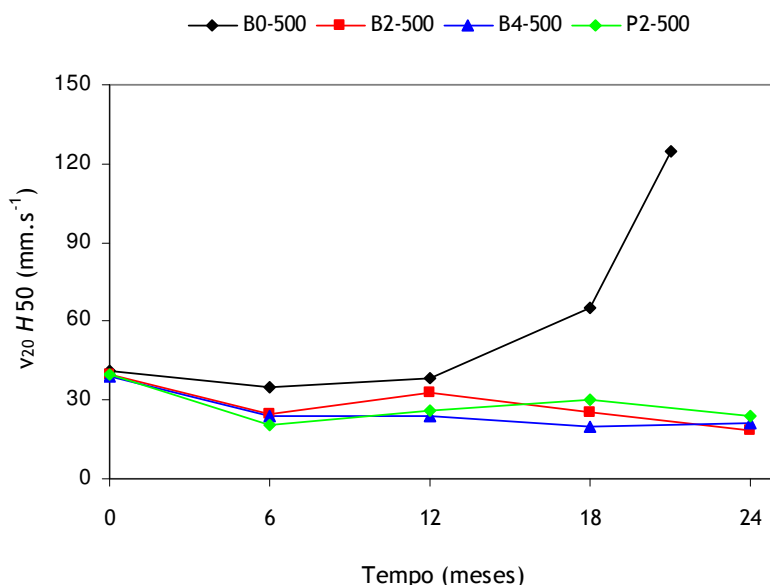


Figura 10.38 - Evolução da  $v_{20} H50$  dos geotêxteis B0-500, B2-500, B4-500 e P2-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais.

A evolução da  $v_{20} H50$  do geotêxtil B0-500 durante a exposição aos agentes climáticos foi muito diferente da evolução das  $v_{20} H50$  dos restantes geotêxteis: a  $v_{20} H50$  do geotêxtil B0-500 aumentou, enquanto que as  $v_{20} H50$  dos outros geotêxteis diminuíram relativamente às  $v_{20} H50$  originais. Após 18 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía uma  $v_{20} H50$  (65,3 mm.s<sup>-1</sup>) superior às  $v_{20} H50$  dos restantes geotêxteis ( $v_{20} H50$  de 25,6 mm.s<sup>-1</sup>, 20,1 mm.s<sup>-1</sup> e 30,2 mm.s<sup>-1</sup> para os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500, respectivamente).

As diferenças entre o geotêxtil B0-500 e os restantes geotêxteis tornaram-se ainda mais acentuadas com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos. A  $v_{20} H50$  do geotêxtil B0-500 aos 21 meses de exposição (125 mm.s<sup>-1</sup>) era muito superior às  $v_{20} H50$  dos restantes geotêxteis ao fim de 24 meses de exposição (18,5 mm.s<sup>-1</sup>, 21,4 mm.s<sup>-1</sup> e 23,7 mm.s<sup>-1</sup> para os geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500, respectivamente). As  $v_{20} H50$  dos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 foram muito idênticas entre si e sempre inferiores às respectivas  $v_{20} H50$  originais.

A  $v_{20} H50$  do geotêxtil B0-500 aumentou devido à elevada degradação ocorrida no material durante a exposição aos agentes climáticos reais. A diminuição da espessura e da massa por unidade de área (com perda de massa polimérica) resultaram na alteração das propriedades hidráulicas do material (grande aumento das velocidades de escoamento  $v_{20}$  e da permissividade  $\Psi$ ).

As  $v_{20} H50$  dos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 sofreram uma diminuição devido à acumulação de sujidade nos espaços livres existentes entre as fibras dos materiais. Dado que a degradação ocorrida nos geotêxteis B2-500, B4-500 e P2-500 não foi tão grande como a degradação sofrida pelo geotêxtil B0-500 (não contribuindo tão significativamente para o aumento da  $v_{20} H50$ ), o preenchimento e/ou a colmatação dos espaços livres existentes entre as fibras destes materiais originou a diminuição das respectivas  $v_{20} H50$ . A incorporação de aditivos nos geotêxteis resultou numa maior resistência aos agentes climáticos, retardando bastante a degradação sofrida pelos materiais.



Assim, e caso não ocorra degradação significativa (com perda de massa polimérica e diminuição da espessura e da massa por unidade de área), a exposição de geotêxteis não-tecidos agulhados ao ar livre irá muito provavelmente provocar uma diminuição das velocidades de escoamento  $v_{20}$  e da permissividade  $\Psi$  dos materiais (devido à acumulação de sujidade).

#### 10.4.8 - Microscopia electrónica de varrimento e microanálise por raio X

##### 10.4.8.1 - Geotêxtil B0-500

Após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais, a maioria das fibras do geotêxtil B0-500 estava revestida por uma camada de sujidade (formada a partir de poeiras e pequenas partículas de lixo) (Figura 10.39). A camada de sujidade apresentava várias fendas e aparentemente não existia em algumas zonas das fibras. Deste modo, foi possível observar a presença de alguns danos (fissuras transversais) nas fibras do geotêxtil B0-500 (danos responsáveis pela deterioração das propriedades mecânicas do material). As zonas assinaladas na Figura 10-39f com a cor vermelha (zona A) e com a cor azul (zona B) foram analisadas por espectroscopia de raio X (Figura 10.40).

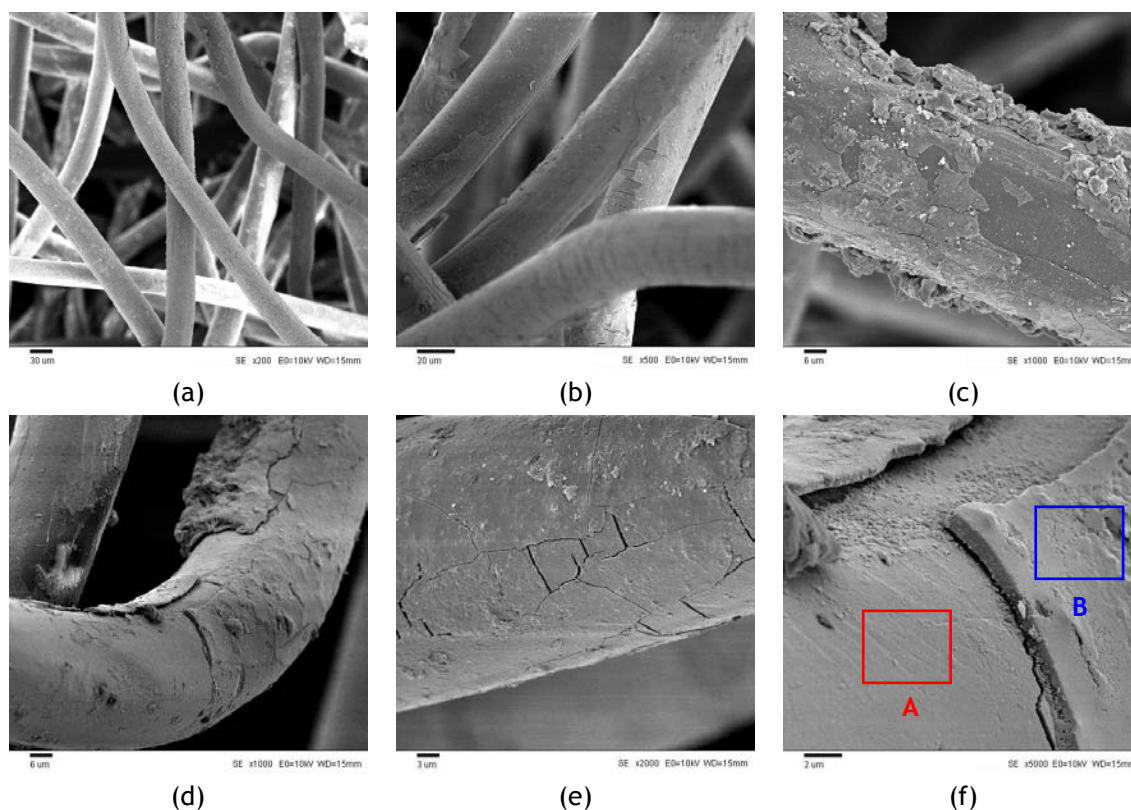


Figura 10.39 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x200; (b) x500; (c) x1000; (d) x1000; (e) x2000; (f) x5000.

A zona A era constituída maioritariamente por carbono e por ouro (oriundo do revestimento), sendo por isso uma parte da fibra. A zona B possuía silício e oxigénio na sua composição, confirmando que se trata da camada de sujidade que reveste as fibras. O carbono existente no espectro de raio X da zona B é uma contribuição de fundo da fibra que se encontra por debaixo da camada de sujidade. O ouro proveniente do revestimento foi também detectado na zona B.

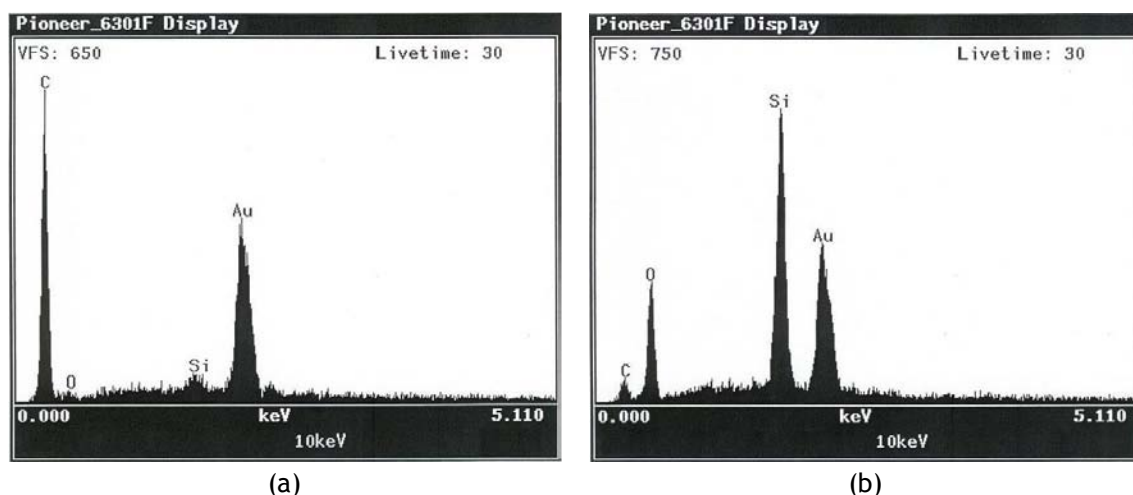
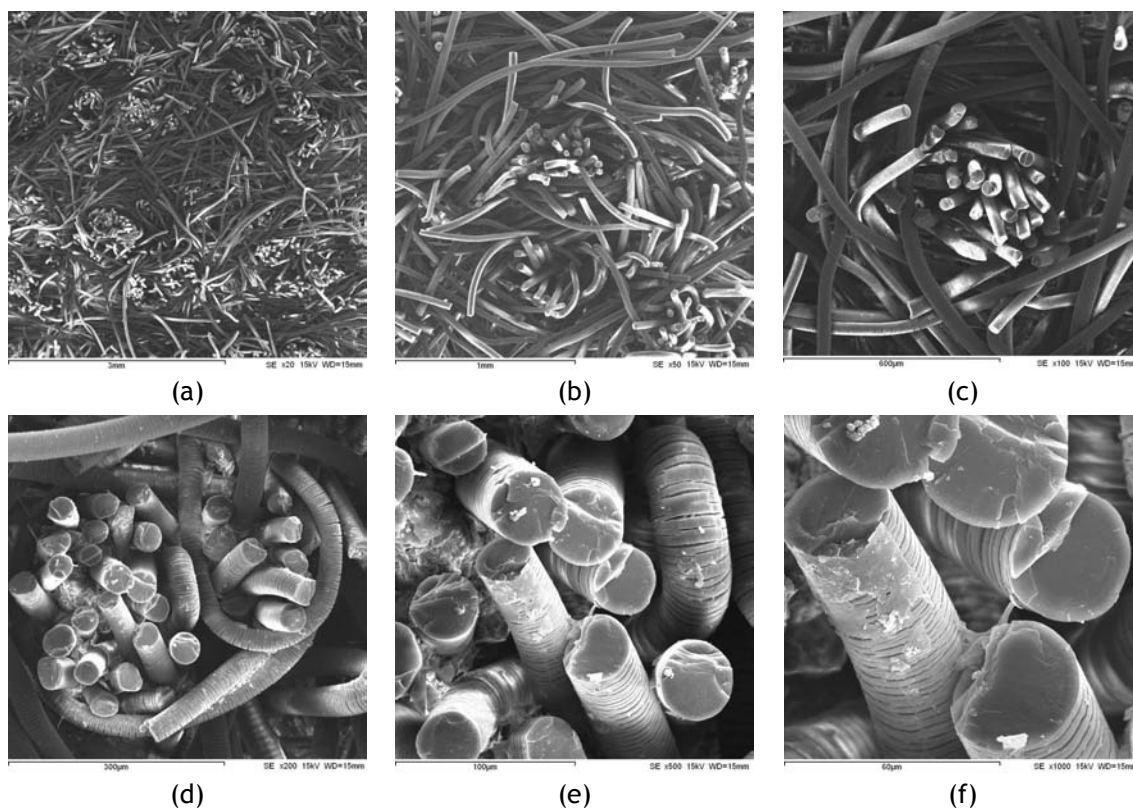


Figura 10.40 - Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.39f): (a) zona A; (b) zona B.

A camada de sujidade existente no geotêxtil B0-500 (e nos outros geotêxteis) impede que a radiação solar atinja directamente as fibras do material. Assim, a sujidade acumulada nos materiais poderá até ter um efeito protector, retardando a degradação provocada pelos agentes climáticos.

Ao fim de 12 meses de exposição, os danos existentes no geotêxtil B0-500 eram muito superiores aos danos encontrados depois de 6 meses de exposição (o que está de acordo com os resultados obtidos na caracterização física e mecânica do material). De facto, após 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-500 possuía várias fibras partidas e as fissuras transversais eram maiores, mais profundas e muito mais abundantes (Figura 10.41).



(a Figura 10.41 continua na página seguinte)

(continuação da Figura 10.41)

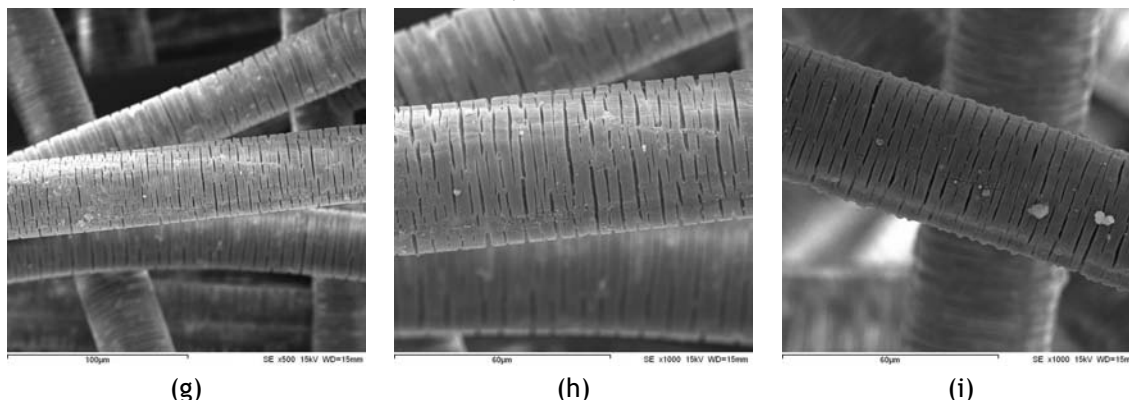


Figura 10.41 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x20; (b) x50; (c) x100; (d) x200; (e) x500; (f) x1000; (g) x500; (h) x1000; (i) x1000.

As fibras dispostas verticalmente (com orientação para cima, perpendiculares ao plano do material) estavam todas quebradas (Figura 10.41a - 10.41f), enquanto que as fibras dispostas horizontalmente (paralelas ao plano do material) possuíam sinais visíveis de degradação (fissuras transversais) (Figura 10.41g - 10.41i). A degradação existente no geotêxtil B0-500 originou a libertação de imensas fibras degradadas (facilmente perceptível a olho nu), o que originou uma diminuição da sua espessura e da sua massa por unidade de área.

A camada de sujidade que revestia as fibras não foi observada no lado superior do geotêxtil B0-500 (lado directamente exposto aos agentes climáticos reais) após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais. No entanto, a análise do lado inferior do material (lado oposto ao de exposição) mostrou a existência de uma grande quantidade de sujidade acumulada (Figura 10.42). A sujidade (poeiras e pequenas partículas de lixo) tem tendência a acumular-se no lado inferior dos materiais (por gravidade e/ou arrastada pela chuva). Alguns pedaços de fibras superiores danificadas podem também acumular-se em zonas mais interiores dos materiais.

As fibras localizadas no lado oposto ao lado de exposição não possuíam danos visíveis. Estas fibras encontram-se protegidas da acção directa da radiação solar (e de outros agentes climáticos), quer pelas fibras localizadas imediatamente acima, quer pela sujidade e restos de fibras degradadas que se vão acumulando na parte inferior dos materiais. As zonas da Figura 10.42d assinaladas com a cor vermelha (zona C) e com a cor azul (zona D) foram analisadas por espectroscopia de raio X; a Figura 10.43 ilustra os espectros obtidos.

A zona C possuía maioritariamente carbono na sua composição (o ouro está sempre presente devido ao revestimento), sendo por isso uma parte da fibra com pouca ou nenhuma sujidade. A zona D era constituída por carbono, oxigénio, alumínio e silício (todos em grandes quantidades) e, em menores quantidades, por sódio, magnésio, potássio, cálcio e ferro (confirmando que se trata de sujidade). O carbono detectado na zona D é devido à contribuição de fundo da fibra que se encontra por debaixo da camada da sujidade e à presença de pequenos pedaços de fibras degradadas que possam fazer parte dessa camada de sujidade.

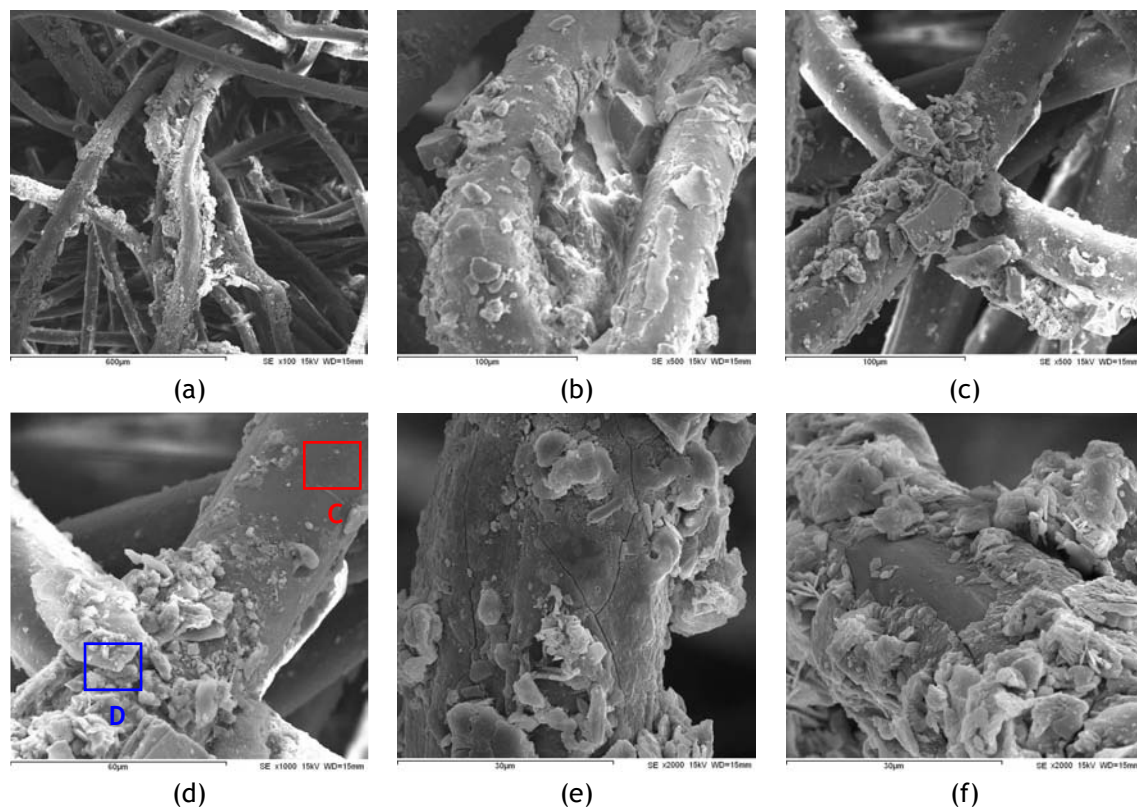


Figura 10.42 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 (lado oposto ao de exposição) após 12 meses de exposição: (a) x100; (b) x500; (c) x500; (d) x1000; (e) x2000; (f) x2000.

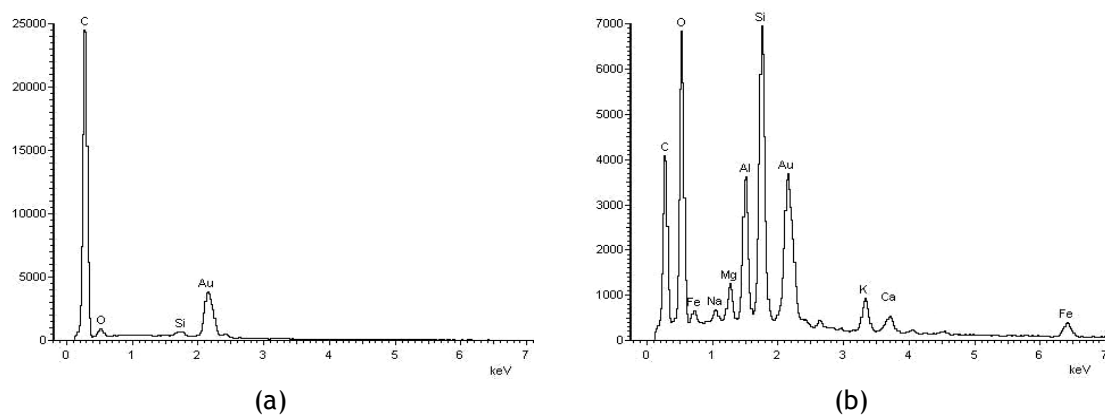


Figura 10.43 - Espectros de raio X do geotêxtil B0-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.42d): (a) zona C; (b) zona D.

Os danos microscópicos encontrados no geotêxtil B0-500 após 18 meses de exposição ao clima eram muito semelhantes aos danos observados ao fim de 12 meses de exposição. A Figura 10.44 ilustra o aspecto do material depois de 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

A degradação do geotêxtil B0-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais começou pelas fibras superiores (directamente expostas aos agentes climáticos), que vão sendo sucessivamente quebradas e removidas do topo do material (arrastadas pelo vento ou pela chuva). À medida que as fibras superiores são removidas (com consequente diminuição da espessura e da massa por unidade de área), as fibras localizadas imediatamente abaixo (e ainda não totalmente degradadas) ficam sob a acção directa dos agentes climáticos e sofrem também degradação completa.



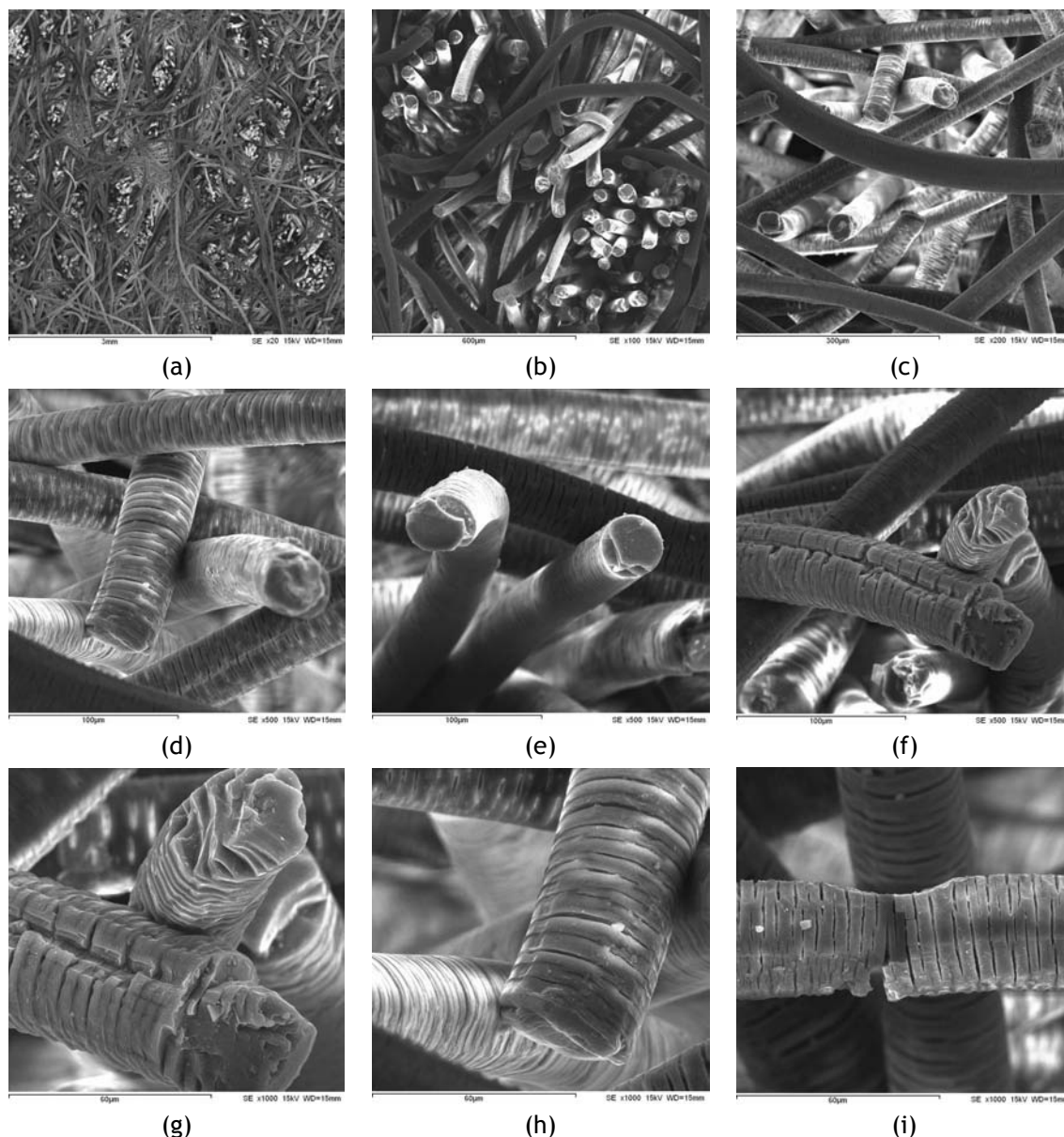


Figura 10.44 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B0-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x20; (b) x100; (c) x200; (d) x500; (e) x500; (f) x500; (g) x1000; (h) x1000; (i) x1000.

O processo de degradação do geotêxtil B0-500 durante a exposição aos agentes climáticos ocorreu gradualmente das fibras superiores (directamente expostas) para as fibras inferiores (protegidas da acção directa dos agentes climáticos). As fibras inferiores estavam protegidas da degradação pela presença das fibras superiores (que impediam, por exemplo, que a radiação solar atingisse as fibras localizadas mais abaixo) e pela acumulação de grandes quantidades de sujidade (poeiras, pequenos pedaços de lixo e restos de fibras degradadas) (que também protegia as fibras da exposição solar).

A degradação e remoção das fibras danificadas provocaram uma diminuição gradual da espessura do geotêxtil B0-500 durante a exposição aos agentes climáticos (tornando-o cada vez mais frágil). A degradação completa do geotêxtil B0-500 ocorreu entre os 21 e os 24 meses de exposição (momento em que a degradação atingiu as fibras inferiores do material).

#### 10.4.8.2 - Geotêxtil B2-500

As Figuras 10.45 e 10.46 ilustram algumas imagens obtidas por MEV para o geotêxtil B2-500 após 6 e 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais, respectivamente. Do mesmo modo, as Figuras 10.47 e 10.48 mostram, respectivamente, algumas imagens obtidas por MEV para o geotêxtil B2-500 ao fim de 18 e 24 meses de exposição. As imagens obtidas depois de 30 e 36 meses de exposição encontram-se nas Figuras 10.49 e 10.50, respectivamente.

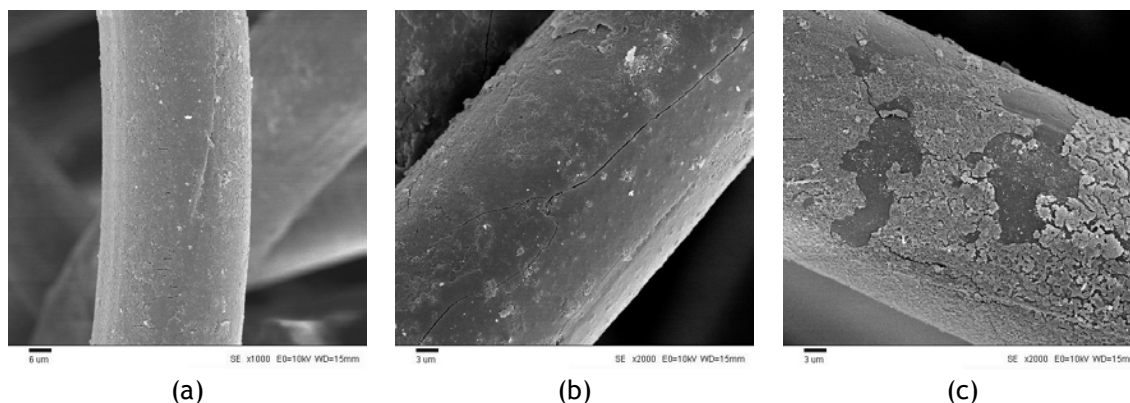


Figura 10.45 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x2000; (c) x2000.

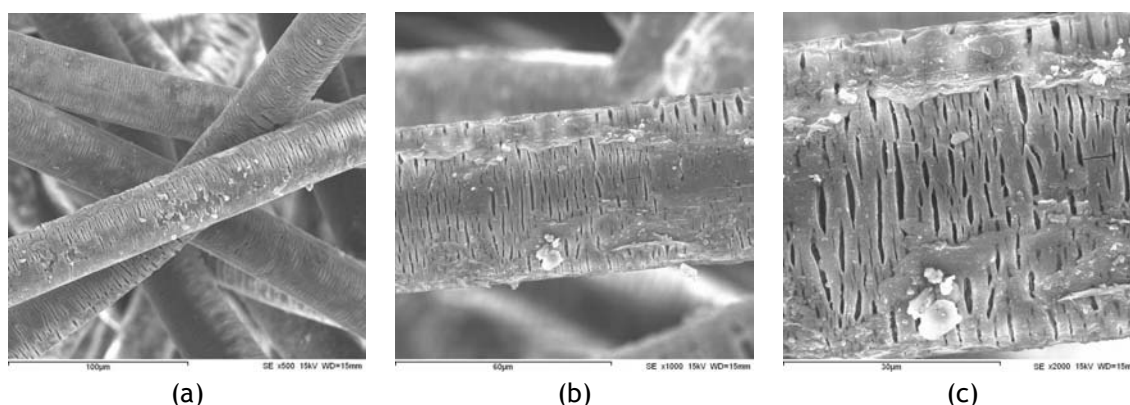


Figura 10.46 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

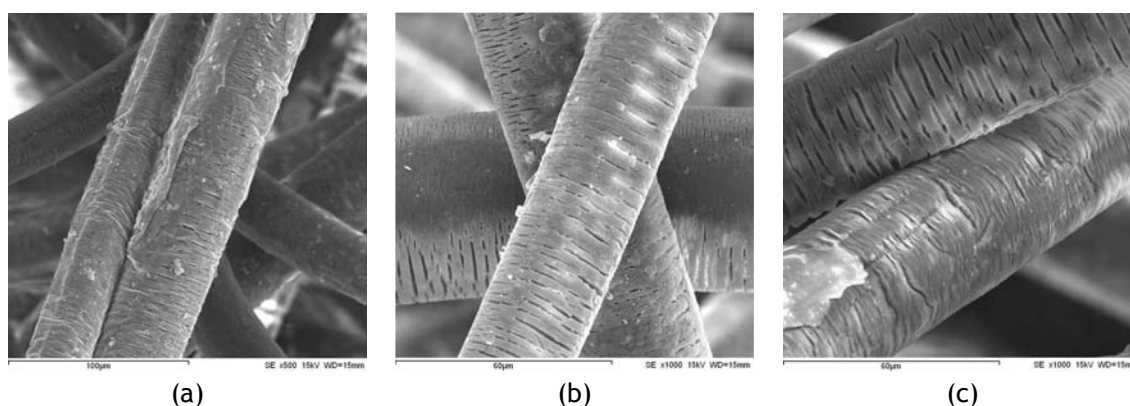


Figura 10.47 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

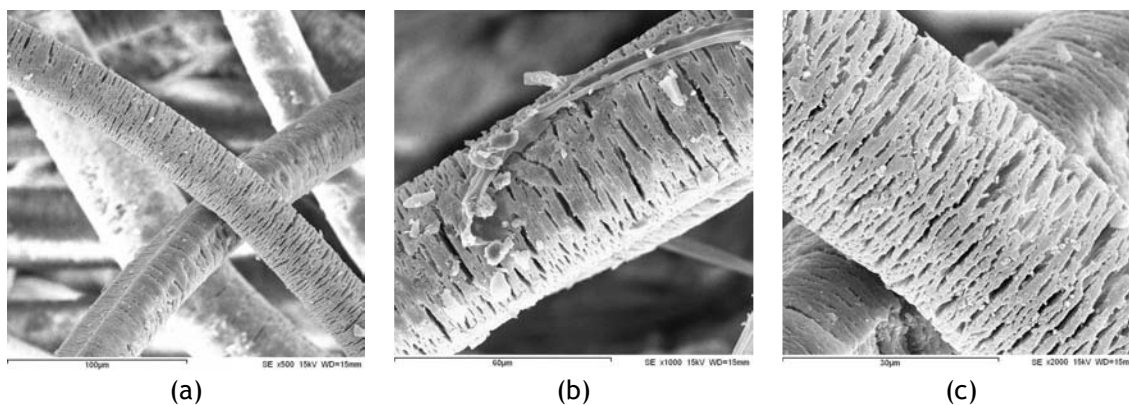


Figura 10.48 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

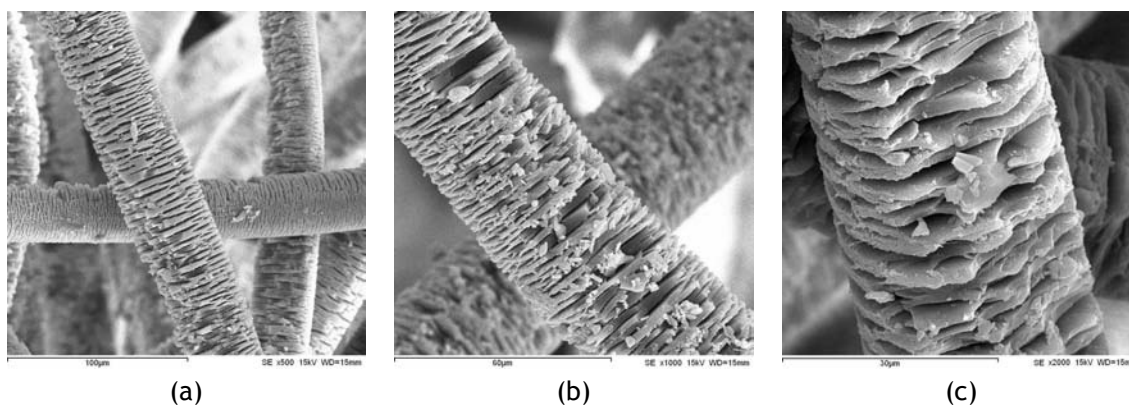


Figura 10.49 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

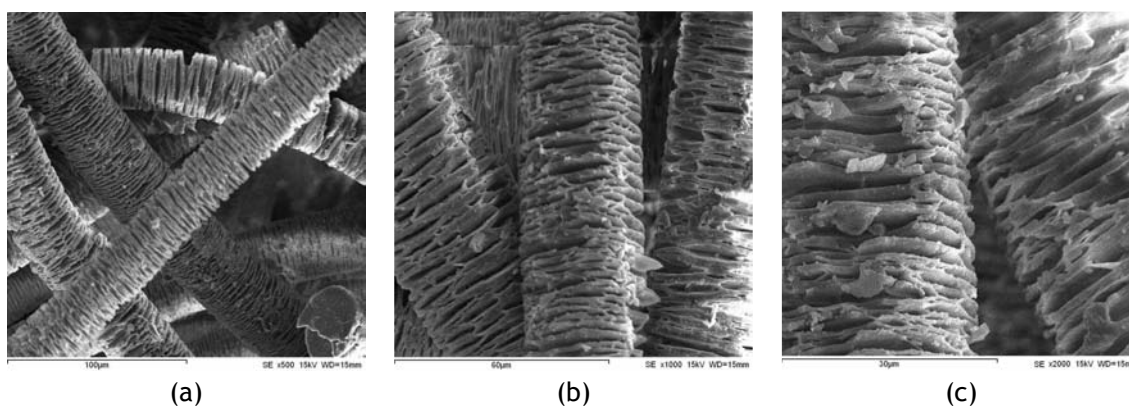


Figura 10.50 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

De um modo geral, as fibras do geotêxtil B2-500 expostas durante 6 meses aos agentes climáticos reais não possuíam sinais visíveis de degradação. No entanto, e à semelhança das fibras do geotêxtil B0-500, a maioria das fibras do geotêxtil B2-500 estava revestida por uma camada de sujidade (as fissuras que se observam na Figura 10.45b são na camada de sujidade e não na fibra).

O aumento do tempo de exposição provocou o aparecimento de danos visíveis nas fibras do geotêxtil B2-500 (e a diminuição da camada de sujidade que revestia as fibras directamente expostas à acção dos agentes climáticos). Ao fim de 12 meses de exposição, as fibras do geotêxtil B2-500 possuíam várias fissuras transversais (não foram encontradas fibras partidas).

As fissuras existentes nas fibras do geotêxtil B2-500 tornaram-se mais largas e mais profundas com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos. Após 36 meses de exposição, as fibras (é importante lembrar que apenas estamos a efectuar a análise microscópica das fibras directamente expostas aos agentes climáticos) estavam muito danificadas (algumas fibras estavam próximo da degradação completa). No entanto, e ao contrário do que seria de esperar pela diminuição ocorrida na espessura, a quantidade de fibras quebradas encontrada no geotêxtil B2-500 foi muito pequena (pode ser observada um fibra partida no canto inferior direito da Figura 10.50a).

Os danos encontrados no geotêxtil B2-500 foram muito inferiores aos danos encontrados no geotêxtil B0-500 (comparando amostras expostas durante o mesmo intervalo de tempo). A incorporação de uma pequena quantidade de C944 (0,2%) retardou a degradação causada pela exposição aos agentes climáticos reais e aumentou consideravelmente o tempo de vida útil das fibras de PP (degradação completa do geotêxtil B0-500 após 24 meses de exposição).

#### 10.4.8.3 - Geotêxtil B4-500

Tal como as fibras dos geotêxteis B0-500 e B2-500, a maioria das fibras do geotêxtil B4-500 expostas durante 6 meses aos agentes climáticos também estavam revestidas por uma camada de sujidade (poeiras e pequenas partículas de lixo) (Figura 10.51). Não foram encontrados danos microscópicos no geotêxtil B4-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais (porque simplesmente não existiam ou porque a sujidade acumulada impediu a sua observação). A camada de sujidade que envolvia as fibras possuía várias fissuras (facilmente visíveis na Figura 10.51).

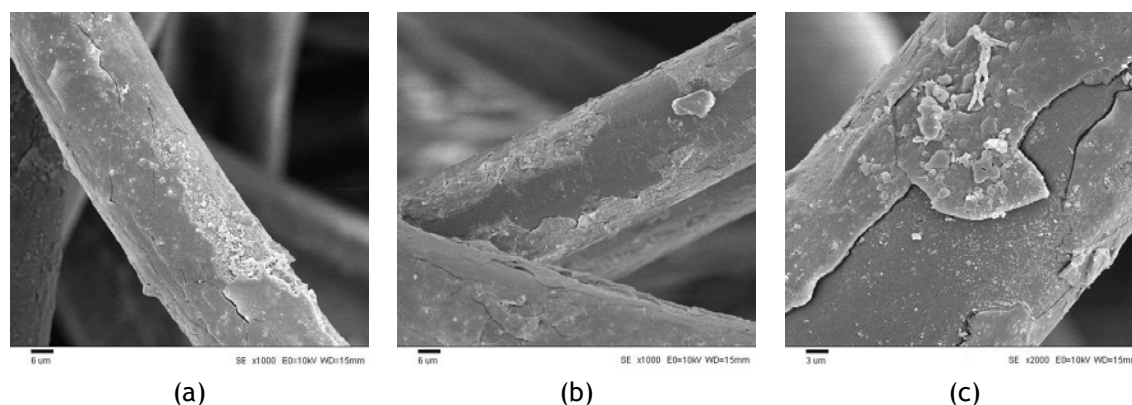


Figura 10.51 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.

Aos 12 meses de exposição, as fibras do geotêxtil B4-500 ainda estavam revestidas pela camada de sujidade (Figura 10.52). No entanto, em várias zonas da fibra, essa camada de sujidade era mínima ou inexistente. Assim, foi possível observar a existência de danos (fissuras transversais) nas fibras do geotêxtil B4-500 (danos menores e menos abundantes que os danos encontrados no geotêxtil B2-500 após o mesmo período de exposição).

A Figura 10.53 ilustra duas imagens obtidas por MEV de uma fibra do geotêxtil B4-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais (uma resultante da detecção de electrões secundários, a outra resultante da detecção de electrões rectrodifundidos).



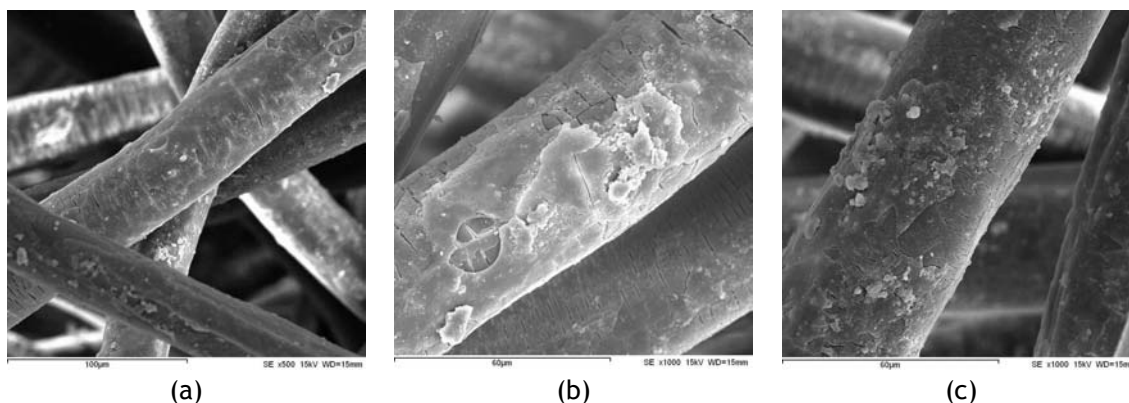


Figura 10.52 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

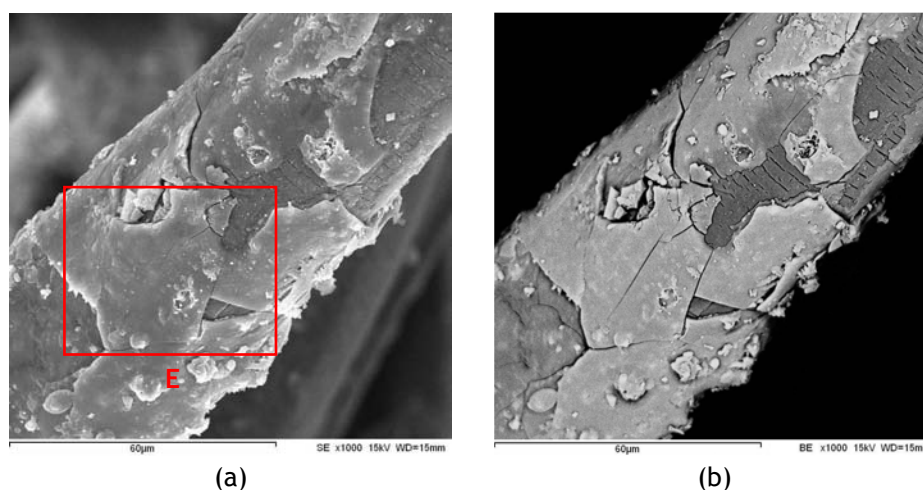


Figura 10.53 - Imagens obtidas por MEV de uma fibra do geotêxtil B4-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (x1000): (a) imagem de electrões secundários; (b) imagem de electrões rectrodifundidos.

A Figura 10.53b (electrões rectrodifundidos) possui um grande contraste de cor, que varia de acordo com o número atómico médio dos elementos químicos presentes na amostra (as zonas com maior número atómico médio possuem uma cor mais clara). Assim, e dado que o número atómico médio da fibra (constituída por carbono) é menor que o número atómico médio dos elementos que formam a camada de sujidade (oxigénio, silício, entre outros), é possível identificar com segurança as zonas da imagem onde estamos a observar as fibras e as zonas onde estamos a observar sujidade. No caso concreto da Figura 10.53, apenas as zonas com fissuras transversais (zonas mais escuras) pertencem à fibra do geotêxtil B4-500.

A zona da Figura 10.53a delimitada com a cor vermelha (zona E) foi analisada por espectroscopia de raio X. O espectro obtido (não apresentado) mostrou que a zona E era constituída maioritariamente por carbono, oxigénio e silício. A Figura 10.54 ilustra a distribuição dos elementos químicos (mapas de raio X) carbono (a verde), oxigénio (a branco) e silício (a vermelho) pela zona E (os elementos estão presentes em maior quantidade nos locais onde a sua cor correspondente for mais intensa).

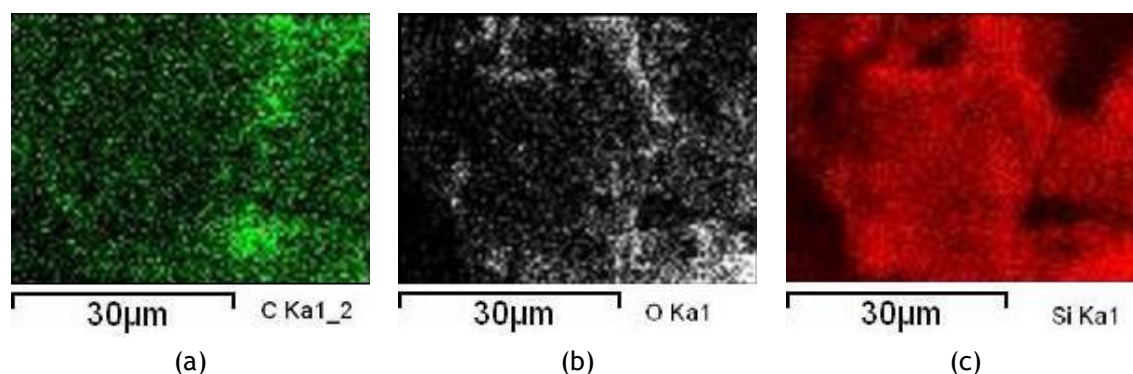


Figura 10.54 - Mapas de raio X de uma fibra do geotêxtil B4-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (zona assinalada a vermelho na Figura 10.53a): (a) carbono; (b) oxigénio; (c) silício.

O carbono estava presente em maior quantidade nas zonas correspondentes à fibra (zonas com cor mais escura na Figura 10.53b) e, em menor quantidade, nas zonas relativas à camada de sujidade (a detecção de carbono nessas zonas ocorre devido à contribuição de fundo da fibra que se encontra por debaixo da camada de sujidade). O oxigénio e o silício estavam presentes em maior quantidade nas zonas correspondentes à camada de sujidade. O mapa de raio X do silício (Figura 10.54c) mostra claramente a existência de uma menor quantidade do composto nas zonas correspondentes à fibra (as zonas com maior quantidade de carbono são as zonas com menor quantidade de silício).

O aumento do tempo de exposição provocou o aumento dos danos existentes nas fibras do geotêxtil B4-500. Após 18 meses de exposição, eram facilmente visíveis várias fissuras transversais nas fibras do material (Figura 10.55); algumas zonas das fibras ainda possuíam restos da camada de sujidade.

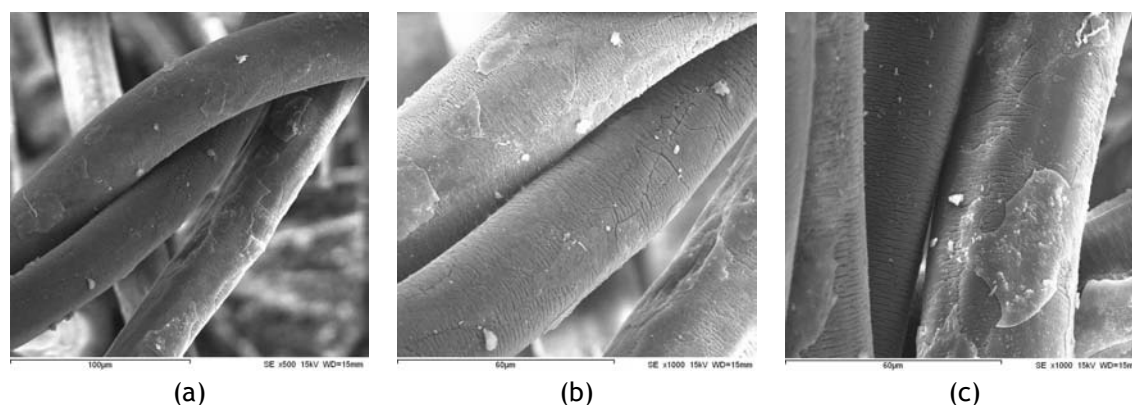


Figura 10.55 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

Após 24 meses de exposição, as fissuras eram maiores, mais profundas e mais abundantes; a camada de sujidade era mínima ou aparentemente inexistente para a maioria das fibras (Figura 10.56). No entanto, foram encontradas algumas partículas unidas às fibras (partículas de origem desconhecida, podendo ser restos de material polimérico degradado ou apenas poeiras ou lixo). As zonas de Figura 10.56c identificadas com a cor vermelha (zona F) e com a cor azul (zona G) foram analisadas por espectroscopia de raio X; os espectros obtidos encontram-se ilustrados na Figura 10.57.

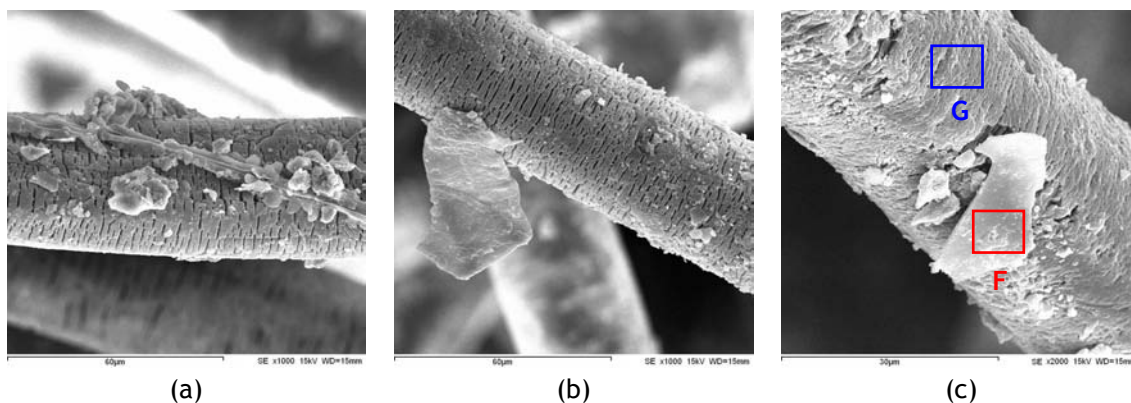


Figura 10.56 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x1000; (b) x1000; (c) x2000.

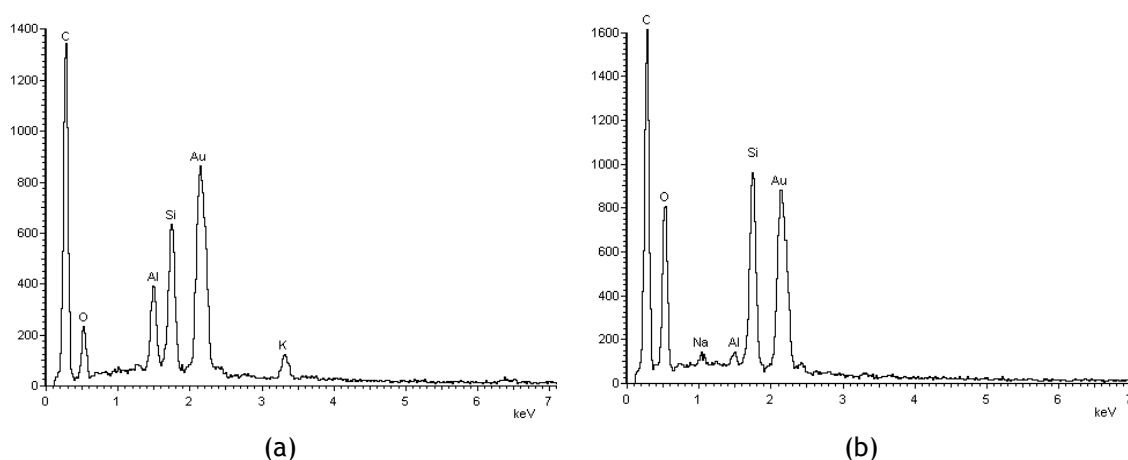


Figura 10.57 - Espectros de raio X do geotêxtil B4-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais (zonas assinaladas na Figura 10.56c): (a) zona F; (b) zona G.

A zona F era constituída por oxigénio, alumínio, silício e potássio (para além do carbono), indicando que a partícula observada na Figura 10.56b não resultou da degradação das fibras de PP (a partícula pode ser, por exemplo, uma poeira). O carbono detectado na zona F pode ser devido à contribuição da fibra que se encontra por debaixo da partícula analisada. A zona G (aparentemente uma parte da fibra) era constituída maioritariamente por carbono, oxigénio e silício, indicando a existência de um revestimento por cima da fibra (revestimento visualmente pouco perceptível).

Após 30 e 36 meses de exposição, as fissuras existentes nas fibras do geotêxtil B4-500 eram maiores e mais profundas do que aos 24 meses de exposição (algumas fibras perderam pedaços de material polimérico; a camada de sujidade era mínima ou aparentemente inexistente na maioria das fibras). As Figuras 10.58 e 10.59 ilustram o aspecto do geotêxtil B4-500 após 30 e 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais.

Os danos encontrados nas fibras do geotêxtil B4-500 foram muito menores que os danos encontrados nas fibras do geotêxtil B2-500 (comparando amostras com o mesmo tempo de exposição), o que está de acordo com os resultados obtidos na caracterização física e mecânica dos materiais. Deste modo, a incorporação de uma maior quantidade de C944 resultou numa maior resistência das fibras de PP contra a degradação promovida pelos agentes climáticos reais.

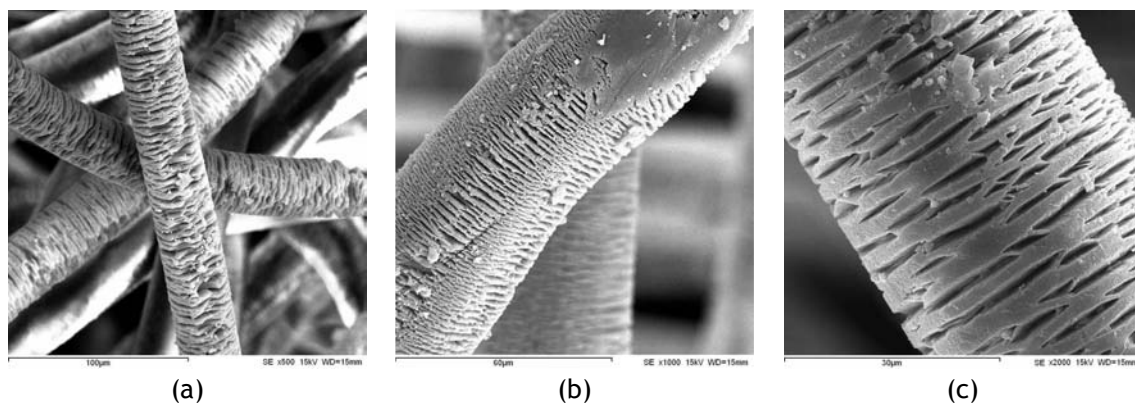


Figura 10.58 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

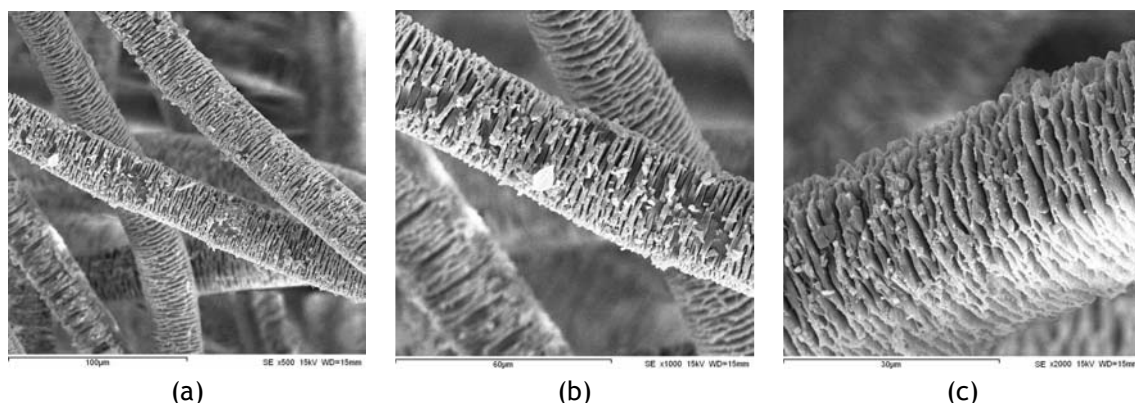


Figura 10.59 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil B4-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

#### 10.4.8.4 - Geotêxtil P2-500

Tal como as fibras dos geotêxteis anteriores, as fibras do geotêxtil P2-500 expostas durante 6 meses aos agentes climáticos também estavam revestidas por uma camada de sujidade (o que complicou a observação de possíveis danos existentes nas fibras). A Figura 10.60 ilustra algumas imagens das fibras do geotêxtil P2-500 depois de 6 meses de exposição aos agentes climáticos (as fissuras que se podem observar na Figura 10.60c são na camada de sujidade e não na fibra).

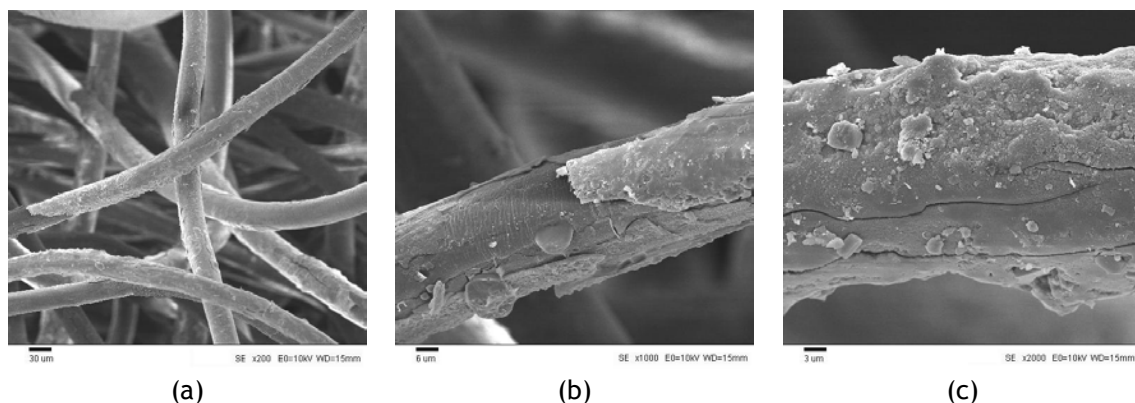


Figura 10.60 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 6 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x200; (b) x1000; (c) x2000.



De um modo geral, as fibras do geotêxtil P2-500 ainda estavam revestidas pela camada de sujidade aos 12 meses de exposição aos agentes climáticos (em algumas zonas, as fibras possuíam mesmo uma grande quantidade de sujidade acumulada) (Figura 10.61). No entanto, existiam também zonas em que o revestimento de sujidade era mínimo ou inexistente, permitindo a observação de algumas fissuras transversais (Figura 10.61b).

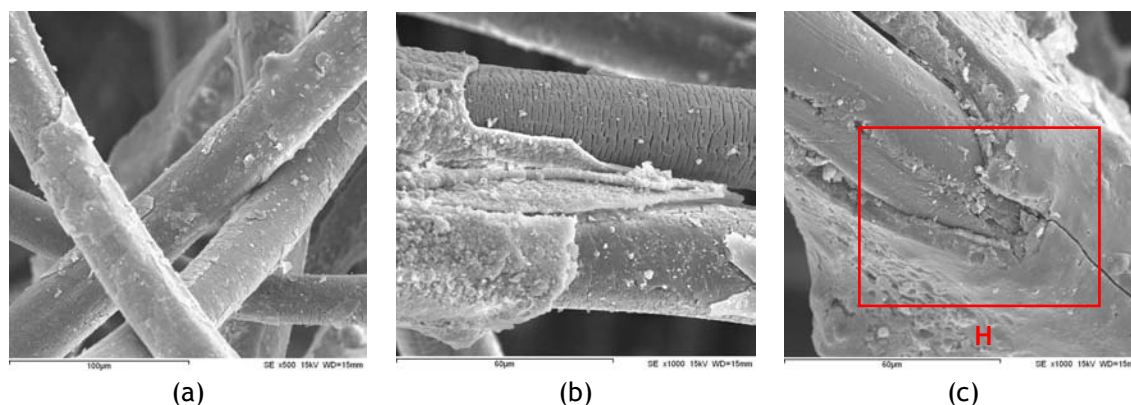


Figura 10.61 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

A zona da Figura 10.61c delimitada com a cor vermelha (zona H) foi analisada por espectroscopia de raio X. O espectro obtido (não apresentado) mostrou que a zona H era constituída maioritariamente pelos elementos químicos carbono, oxigénio, silício e cálcio. A Figura 10.62 ilustra a distribuição dos elementos pela zona H: carbono (a verde), oxigénio (a branco), silício (a vermelho) e cálcio (a azul).

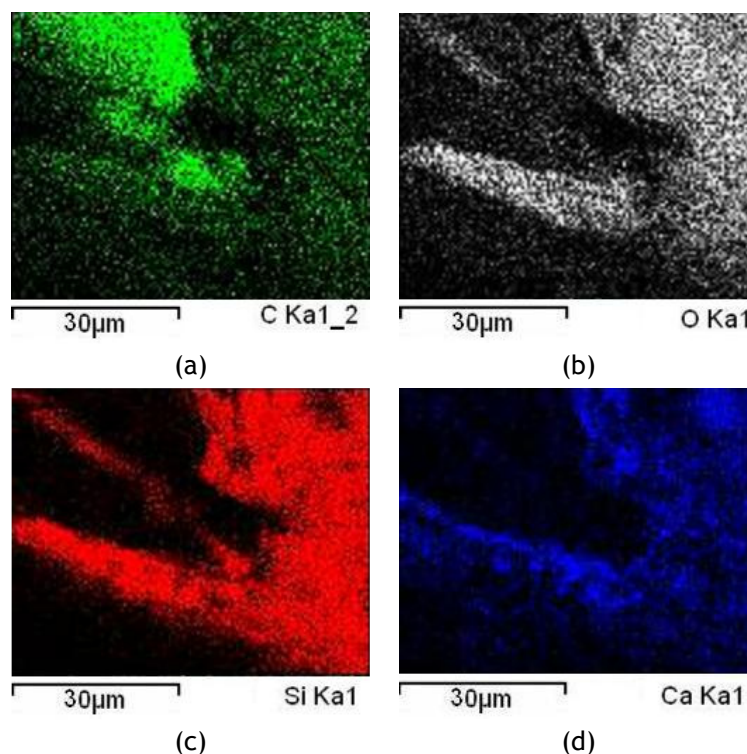


Figura 10.62 - Mapas de raio X de uma fibra do geotêxtil P2-500 exposta durante 12 meses aos agentes climáticos reais (zona assinalada a vermelho na Figura 10.61c): (a) carbono; (b) oxigénio; (c) silício; (d) cálcio.

O carbono estava presente em maior quantidade na zona relativa à fibra (cor verde mais intensa); o carbono foi também detectado por toda a camada de sujidade (devido à contribuição da fibra que estava por debaixo dessa camada). O oxigénio, o silício e o cálcio existiam em maiores quantidades na camada de sujidade (estes elementos eram inexistentes ou existiam em pequenas quantidades na zona correspondente à fibra). As zonas com maior quantidade de carbono (fibra) eram as zonas com menores quantidades de oxigénio, silício e cálcio (a cor verde do carbono é mais abundante no local onde as cores vermelha, branca e azul são menos abundantes).

O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos provocou uma diminuição da camada de sujidade e o aparecimento de várias fissuras nas fibras do geotêxtil P2-500 (à medida que aumentou o tempo de exposição, as fissuras tornaram-se maiores, mais profundas e mais abundantes).

As Figuras 10.63 e 10.64 ilustram o aspecto do geotêxtil P2-500 após 18 e 24 meses de exposição aos agentes climáticos, respectivamente. Do mesmo modo, o aspecto do geotêxtil P2-500 aos 30 e 36 meses de exposição pode ser observado nas Figuras 10.65 e 10.66, respectivamente.

Os danos existentes no geotêxtil P2-500 eram menores que os danos existentes no geotêxtil B2-500 (comparando amostras com o mesmo tempo de exposição). Assim, a incorporação de 1,08% de negro de carbono (para além dos 0,2% de C944) resultou numa protecção extra das fibras de PP contra os danos provocados pela exposição aos agentes climáticos reais.

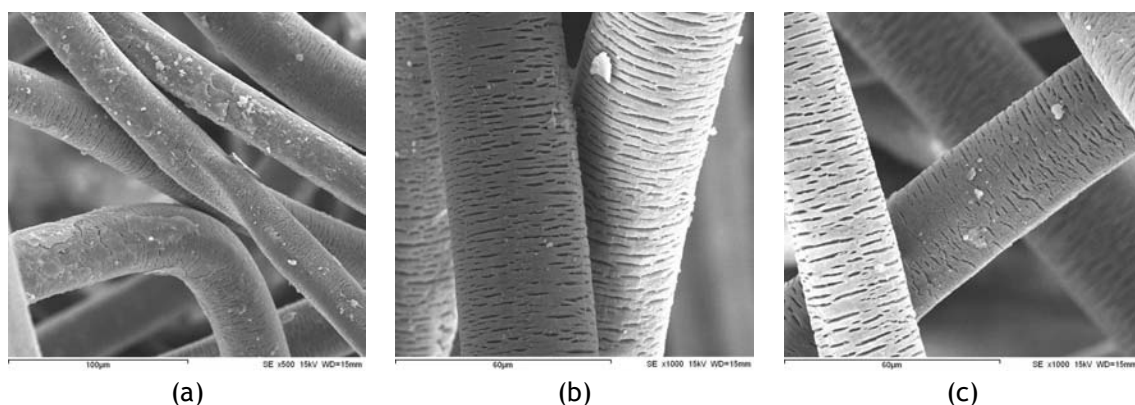


Figura 10.63 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 18 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x1000.

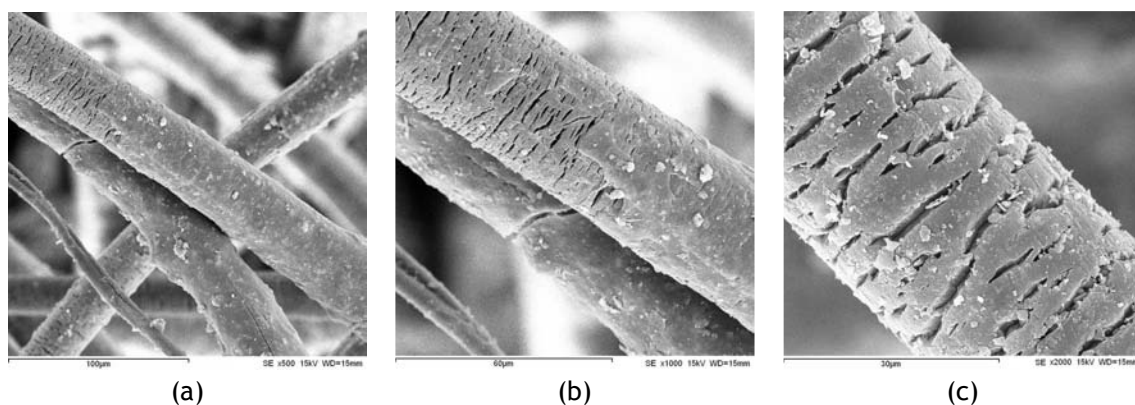


Figura 10.64 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

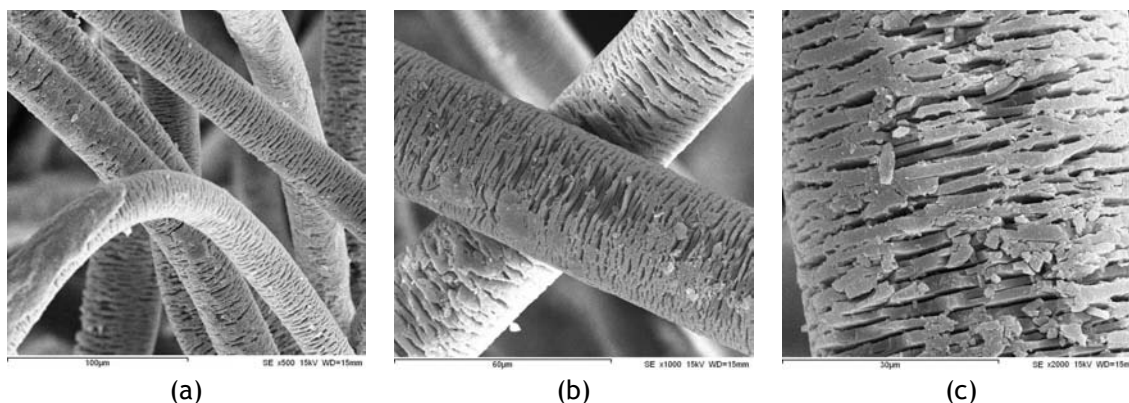


Figura 10.65 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 30 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

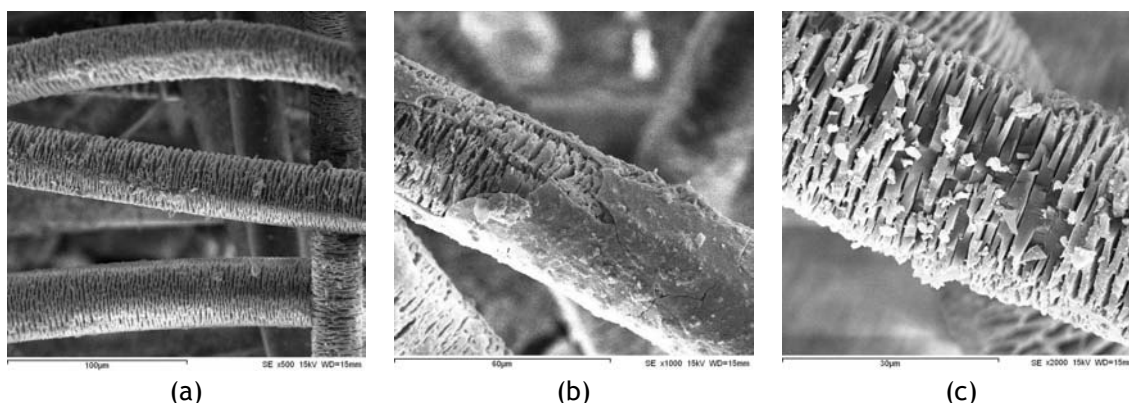


Figura 10.66 - Imagens obtidas por MEV do geotêxtil P2-500 após 36 meses de exposição aos agentes climáticos reais: (a) x500; (b) x1000; (c) x2000.

#### 10.4.9 - Determinação do teor de C944 nos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais

O teor de C944 foi determinado (por HPLC-UV) para os geotêxteis B2-500 e B4-500 expostos durante 6, 12, 18 e 24 meses aos agentes climáticos reais. A Figura 10.67 ilustra os cromatogramas obtidos para o geotêxtil B4-500; a Figura 10.68 mostra a evolução do teor de C944 durante a exposição dos geotêxteis B2-500 e B4-500 aos agentes climáticos reais.

Após 6 meses de exposição aos agentes climáticos, o geotêxtil B2-500 possuía um teor de C944 de 0,177% (92% do teor inicial). O aumento do tempo de exposição provocou uma diminuição do teor de C944. De facto, aos 12 e 18 meses de exposição, o teor de C944 existente no geotêxtil B2-500 era de 0,075% (39% do teor inicial) e de 0,034% (18% do teor inicial), respectivamente; ao fim de 24 meses de exposição, o C944 não foi detectado no geotêxtil B2-500.

A quantidade de C944 existente nas fibras do geotêxtil B4-500 também diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais. No entanto, a diminuição ocorrida no geotêxtil B4-500 foi um pouco diferente da diminuição observada no geotêxtil B2-500. De facto, após 6 meses de exposição, a diminuição da quantidade de C944 foi muito maior no geotêxtil B4-500 (de 0,421% para 0,279%) do que no geotêxtil B2-500 (de 0,192% para 0,177%). Aos 18 e 24 meses de exposição, o teor de C944 existente no geotêxtil B4-500 era de 16% do valor inicial (18% no geotêxtil B2-500) e de 9% do valor inicial (não detectado no geotêxtil B2-500), respectivamente.

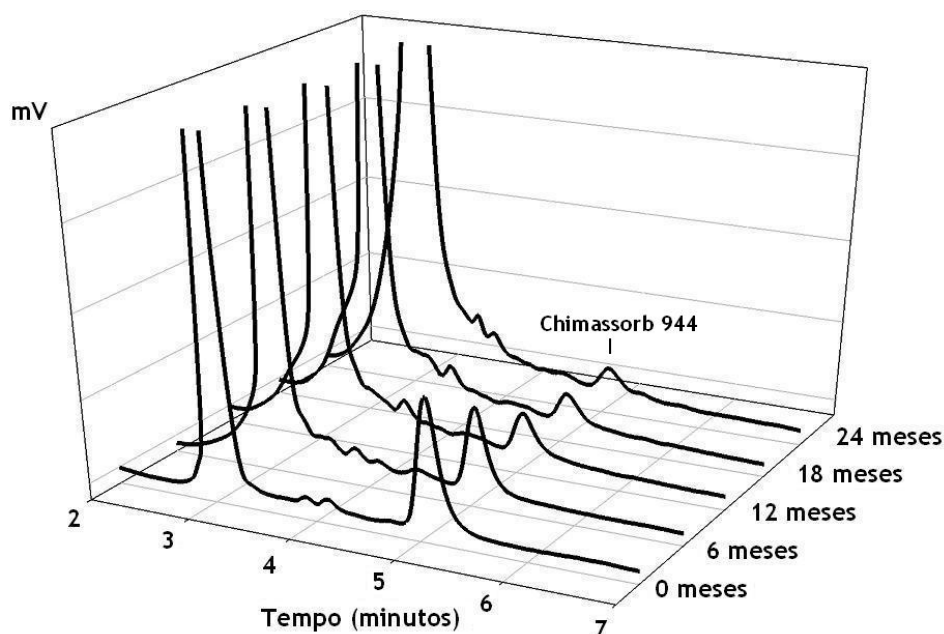


Figura 10.67 - Cromatogramas obtidos para o geotêxtil B4-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

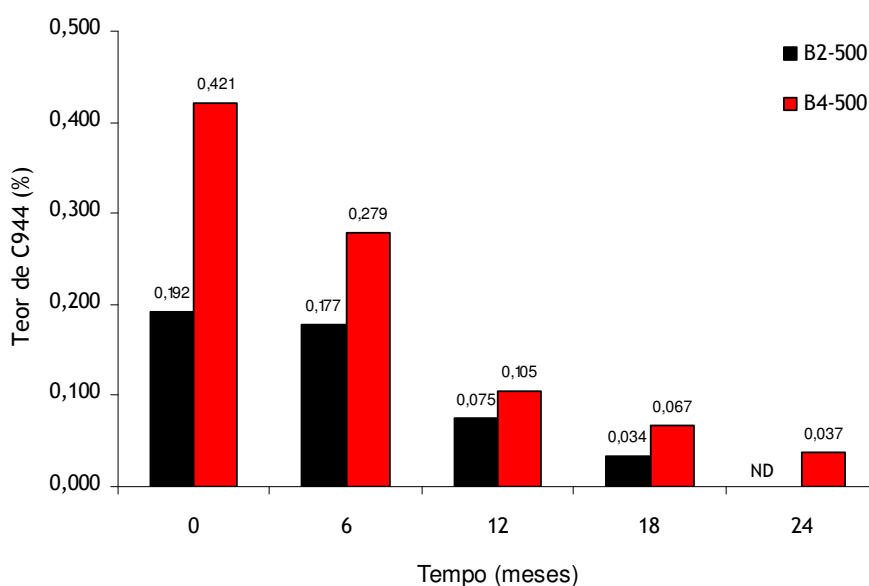


Figura 10.68 - Evolução do teor de C944 nos geotêxteis B2-500 e B4-500 durante a exposição aos agentes climáticos reais (ND - não detectado).

A exposição dos geotêxteis B2-500 e B4-500 aos agentes climáticos reais provocou o consumo e/ou a perda de C944 (em consequência da sua função protectora, o aditivo poderá ter sido transformado noutros compostos). A diminuição do teor de C944 durante a exposição do geotêxtil B4-500 à acção dos agentes climáticos obedeceu a uma cinética de primeira ordem (equação de velocidade do tipo  $[C944] = [C944]_0 \cdot e^{-kt}$ , em que  $[C944]$  é a concentração de C944,  $[C944]_0$  é a concentração inicial de C944, “e” é a base dos logaritmos naturais, “k” é a constante de velocidade e “t” é o tempo). A representação gráfica de  $[C944]/[C944]_0$  em função do tempo encontra-se ilustrada na Figura 10.69.



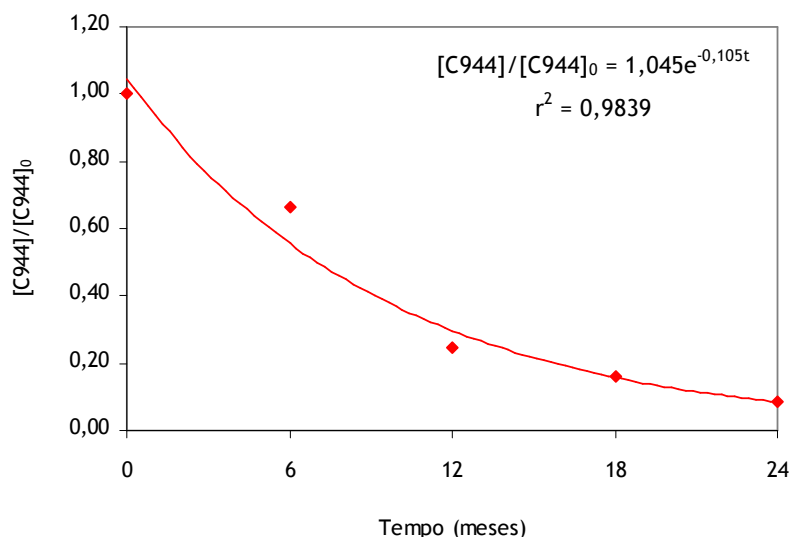


Figura 10.69 - Decaimento exponencial (cinética de primeira ordem) do teor de C944 nas amostras do geotêxtil B4-500 expostas aos agentes climáticos reais.

A quantidade de C944 existente no geotêxtil B4-500 decaiu exponencialmente no tempo (indicando que se trata de uma cinética de primeira ordem). A partir da equação da curva obtida, foi possível estimar que serão necessários cerca de 42 meses para o teor de C944 atingir os 0,005% (perda quase completa do aditivo) (admitindo que as condições de exposição não sofreriam grandes alterações). A análise da evolução do C944 no geotêxtil B2-500 não permitiu determinar com certeza a cinética da diminuição do aditivo durante a exposição deste material aos agentes climáticos reais.

A camada de sujidade existente nas fibras dos geotêxteis poderá ter causado algumas interferências na extracção do C944 e, assim, os valores de C944 determinados poderão ser ligeiramente inferiores aos valores reais (no entanto, não foram encontrados indícios da existência de efeitos da camada de sujidade na determinação do C944 nos geotêxteis expostos aos agentes climáticos reais).

### 10.5 - Resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos: exposição real vs simulação laboratorial

Os geotêxteis sem C944 (B0-280 e B0-500) foram completamente destruídos durante a exposição aos agentes climáticos reais e aos agentes climáticos simulados em laboratório. Os danos ocorridos durante 18 meses de exposição ao ar livre foram idênticos aos danos ocorridos durante 250 horas de exposição ao ciclo C44 no QUV. De facto, a resistência à tracção residual do geotêxtil B0-280 era a mesma (0,4%) após 18 meses de exposição ao ar livre e depois de 250 horas de exposição no QUV; a resistência à tracção residual do geotêxtil B0-500 era de 9,3% aos 18 meses ao ar livre e de 5,1% ao fim de 250 horas no QUV.

A degradação sofrida pelos geotêxteis B2-280 e B2-500 durante 36 meses de exposição ao ar livre foi menor que a degradação sofrida durante 1000 horas de exposição no QUV. De facto, após 1000 horas no QUV, os geotêxteis B2-280 e B2-500 possuíam resistências à tracção residuais de 8,4% e de 31,5%, respectivamente; ao fim de 36 meses ao ar livre, as resistências residuais dos geotêxteis B2-280 e B2-500 eram de 18,4% e de 46,5%, respectivamente.

A resistência à tracção residual do geotêxtil B2-280 era semelhante depois de 18 meses ao ar livre (41,8%) e após 500 horas no QUV (43,3%). Do mesmo modo, o geotêxtil B2-500 também apresentava resistências à tracção residuais idênticas ao fim de 18 meses ao ar livre (62,4%) e após 500 horas no QUV (61,7%). Assim, os danos ocorridos nos geotêxteis B2-280 e B2-500 (em termos de resistência à tracção) durante 18 meses de exposição ao ar livre foram semelhantes aos danos ocorridos durante 500 horas de exposição (ao ciclo climático C44) no simulador laboratorial QUV.

Tal como para os geotêxteis B2-280 e B2-500, a degradação sofrida pelos geotêxteis B4-280 e B4-500 durante 36 meses ao ar livre (resistências à tracção residuais de 37,4% e de 61,7%, respectivamente) também foi menor do que a degradação sofrida durante 1000 horas no QUV (resistências à tracção residuais de 32,0% e de 53,6%, respectivamente). Para os geotêxteis estabilizados com 0,4% de C944 não foi possível, para os intervalos de exposição considerados, obter uma relação (em termos de diminuição da resistência à tracção) entre o tempo de exposição ao ar livre e o tempo de exposição em laboratório.

Para os geotêxteis pretos, e ao contrário dos outros geotêxteis estabilizados, os danos ocorridos em 36 meses de exposição ao ar livre foram maiores que os danos ocorridos em 4000 horas de exposição no QUV. De facto, as resistências à tracção residuais dos geotêxteis P2-280 e P2-500 eram maiores após 4000 horas no QUV (74,5% e 68,4%, respectivamente) do que ao fim de 36 meses ao ar livre (61,0% e 61,7%, respectivamente).

Para os geotêxteis brancos, a simulação climática no QUV permitiu prever, num pequeno intervalo de tempo, a durabilidade relativa dos vários materiais. De facto, tanto no envelhecimento artificial, como no envelhecimento natural, os geotêxteis sem C944 (B0-280 e B0-500) foram os que possuíram menor resistência aos agentes climáticos (degradação total), seguindo-se os geotêxteis com 0,2% de C944 (B2-280 e B2-500) e, finalmente, os geotêxteis com 0,4% de C944 (B4-280 e B4-500).

No caso dos geotêxteis pretos, os ensaios climáticos no QUV indicaram que estes materiais eram muito mais resistentes aos agentes climáticos do que os geotêxteis brancos, o que foi contrariado pelos ensaios de exposição ao ar livre. De facto, no QUV, os geotêxteis brancos com 0,2% e com 0,4% de C944 estavam destruídos após 2000 e 4000 horas de exposição, respectivamente, enquanto que os geotêxteis pretos ainda possuíam resistências à tracção residuais bastante elevadas (acima dos 88% após 2000 horas e acima dos 68% ao fim de 4000 horas). De um modo geral, nos ensaios de exposição ao livre, a resistência aos agentes climáticos dos geotêxteis pretos foi apenas um pouco superior (não tão superior como indicado pelos ensaios realizados em laboratório) à resistência dos geotêxteis brancos estabilizados com C944 (por exemplo, a resistência aos agentes climáticos do geotêxtil B4-500 foi muito idêntica à resistência do geotêxtil P2-500).

Assim, é bastante provável que o processo de degradação em laboratório dos geotêxteis pretos não seja exactamente o mesmo que ocorre sob condições naturais. Em laboratório, a presença do negro de carbono nas fibras de PP resultou num aumento muito substancial da resistência dos geotêxteis pretos aos agentes climáticos simulados no QUV. No entanto, em condições naturais, os processos

de degradação dos geotêxteis e/ou de actuação do negro de carbono podem ter sofrido alterações (devido à presença de vários outros agentes de degradação para além daqueles simulados no QUV) e o efeito protector do negro de carbono não resultou num aumento tão grande da durabilidade como em laboratório.

Outro aspecto que também pode ter contribuído para reduzir as diferenças entre a durabilidade dos geotêxteis pretos e a dos geotêxteis brancos durante a exposição sob condições naturais, é o facto da temperatura dos materiais pretos, ao ar livre, ser superior à temperatura dos materiais brancos. Pelo contrário, no QUV, a degradação ocorre à mesma temperatura, independentemente da cor dos materiais (esta é uma das limitações do QUV, que pode ter implicações negativas na qualidade das previsões obtidas).

Tal como para os geotêxteis pretos, o processo de degradação dos geotêxteis brancos sob condições reais pode também não ser o mesmo que ocorre em laboratório (é muito provável que não seja; em condições reais os geotêxteis podem estar expostos a vários agentes de degradação que não foram simulados no QUV). No entanto, para os vários geotêxteis brancos com diferentes estabilizações, as previsões obtidas no QUV (durabilidade relativa) foram confirmadas durante a exposição aos agentes climatéricos reais.

O QUV mostrou que pode ser uma ferramenta bastante útil para distinguir (com alguma confiança) a durabilidade relativa de alguns materiais, mas noutros materiais pode originar previsões erradas. A degradação que ocorre em condições de exposição naturais pode ser muito diferente da degradação que ocorre em laboratório. Além disso, os materiais expostos ao ar livre podem estar sob a acção de vários agentes de degradação (vento, poluentes atmosféricos, bactérias, sujidade, entre outros) que dificilmente poderão ser simulados em laboratório. Assim, a obtenção de uma relação única, geral e inequívoca entre o tempo de exposição sob condições reais e o tempo de exposição em laboratório é uma tarefa muito complicada, se não impossível.

Neste trabalho, não foi possível encontrar uma correlação única e universal entre o envelhecimento natural e o envelhecimento artificial dos vários geotêxteis sob a acção dos agentes climatéricos. No entanto, foram obtidas algumas relações individuais entre a degradação sofrida por alguns materiais sob condições de exposição naturais e em laboratório (por exemplo, para os geotêxteis com 0,2% de C944, 500 horas de exposição no QUV corresponderam a 18 meses de exposição ao ar livre).

A exposição sob condições naturais é o único modo de avaliar com total exactidão o comportamento dos geotêxteis quando expostos aos agentes climatéricos. No entanto, estes ensaios são geralmente muito longos (vários meses ou anos), sendo inexequíveis sempre que for necessário obter resultados com alguma rapidez. Nessas situações, podem ser usados simuladores laboratoriais para determinar (num curto intervalo de tempo) a resistência dos geotêxteis aos agentes climatéricos (nos ensaios de exposição laboratorial é sempre necessário nunca esquecer que o comportamento dos materiais sob condições naturais pode não ser exactamente igual ao seu comportamento em laboratório; com as devidas precauções, os simuladores laboratoriais podem ser muito úteis para avaliar a resistência dos geossintéticos aos agentes climatéricos).

## **10.6 - Considerações finais**

Neste capítulo, procedeu-se a uma avaliação detalhada dos danos ocorridos nos geotêxteis expostos durante um longo período de tempo (36 meses) aos agentes climáticos reais. Durante os 36 meses de ensaio, foram monitorizadas várias propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais. Os resultados obtidos reflectem com total exactidão o comportamento dos geotêxteis expostos às condições climáticas do local de exposição específico (ou de qualquer outro local com um perfil climatológico muito idêntico ao do local onde os materiais foram expostos).

# CAPÍTULO 11

## Determinação da resistência dos geotêxteis aos agentes do solo

### 11.1 - Introdução

Os geotêxteis enterrados no solo podem sofrer degradação através de várias formas: ocorrência de reacções de hidrólise (ácida ou alcalina, dependendo do pH do solo), ataque por raízes, ataque por parte de alguns animais (como por exemplo, os roedores), ataque por microrganismos, entre outros. Assim, é importante avaliar o efeito dos agentes do solo na durabilidade dos materiais.

Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência dos geotêxteis aos vários agentes do solo. Para tal, os geotêxteis foram enterrados num solo húmifero e, após um longo intervalo de tempo, foram recolhidos para caracterização (inspecção visual e ensaios de tracção-extensão e de rasgamento). A degradação sofrida pelos geotêxteis foi avaliada através da comparação dos resultados obtidos para os provetes enterrados com os resultados obtidos para os provetes de referência.

Primeiro, procede-se a uma descrição detalhada do ensaio de exposição dos geotêxteis aos agentes do solo e, em seguida, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos.

### 11.2 - Descrição experimental

Os geotêxteis B0-280 e B0-500 (amostras com 1 m<sup>2</sup>) foram enterrados num solo húmifero (solo arável com coloração escura, muitas vezes designado por “terra preta”) a duas profundidades diferentes (a 5 cm e a 25 cm). Os solos húmiferos possuem maior quantidade de húmus que os outros solos e são geralmente férteis. A escolha de um solo húmifero (não o mais comum nas várias aplicações onde os geotêxteis são usados) deveu-se ao facto deste solo (1) permitir o crescimento de plantas (e, assim, o desenvolvimento de raízes), (2) possuir uma elevada quantidade de microrganismos (que poderão provocar alguma degradação dos materiais) e (3) muitas vezes possuir roedores (como por exemplo, ratos) ou toupeiras que poderão provocar danos localizados nos materiais. O processo de instalação dos materiais a 5 cm de profundidade encontra-se ilustrado na Figura 11.1 (o processo de instalação a 25 cm de profundidade foi semelhante).

As amostras dos geotêxteis foram desenterradas após 6 e 12 meses de exposição aos vários agentes do solo. A Figura 11.2 ilustra o processo de exumação das amostras enterradas à profundidade de 5 cm (o processo de exumação a 25 cm de profundidade foi idêntico). A ocorrência de danificação nos geotêxteis durante os processos de instalação e exumação foi também avaliada. Para tal, amostras dos geotêxteis foram enterradas e, em seguida, foram logo desenterradas.

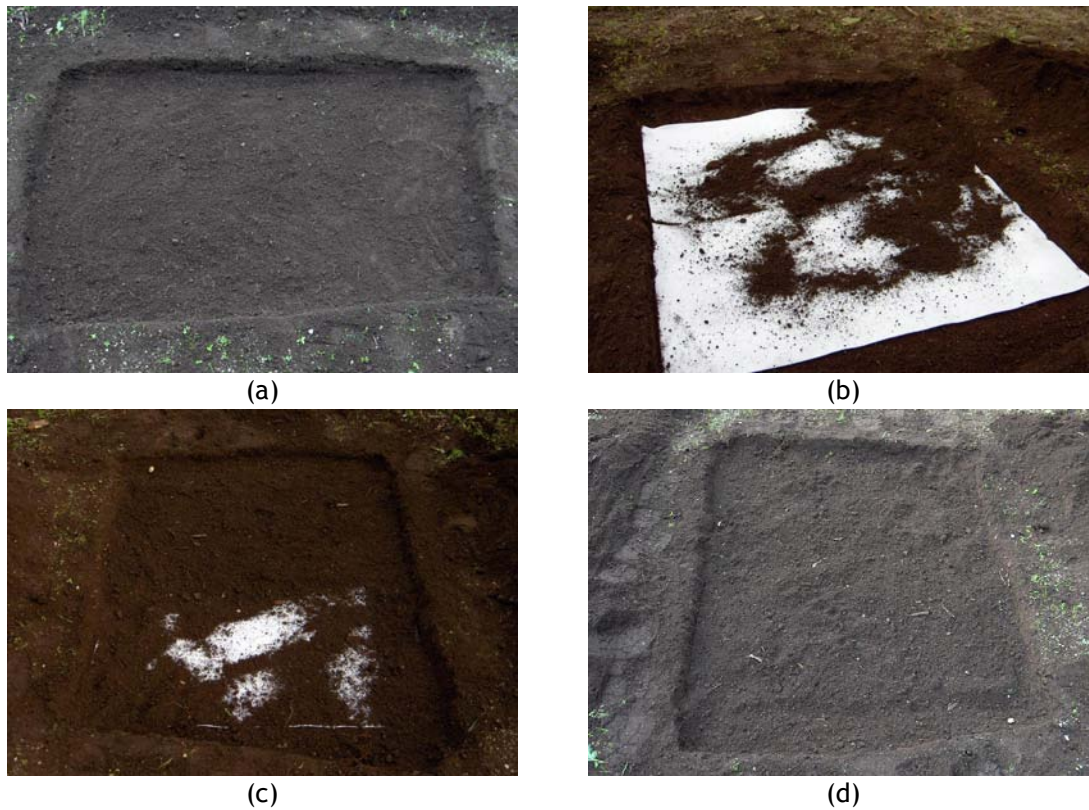


Figura 11.1 - Processo de instalação dos geotêxteis a 5 cm de profundidade:  
(a) cova escavada para a colocação do geotêxtil; (b) fase inicial da cobertura do geotêxtil com solo;  
(c) fase final da cobertura do geotêxtil com solo; (d) geotêxtil totalmente coberto com solo.

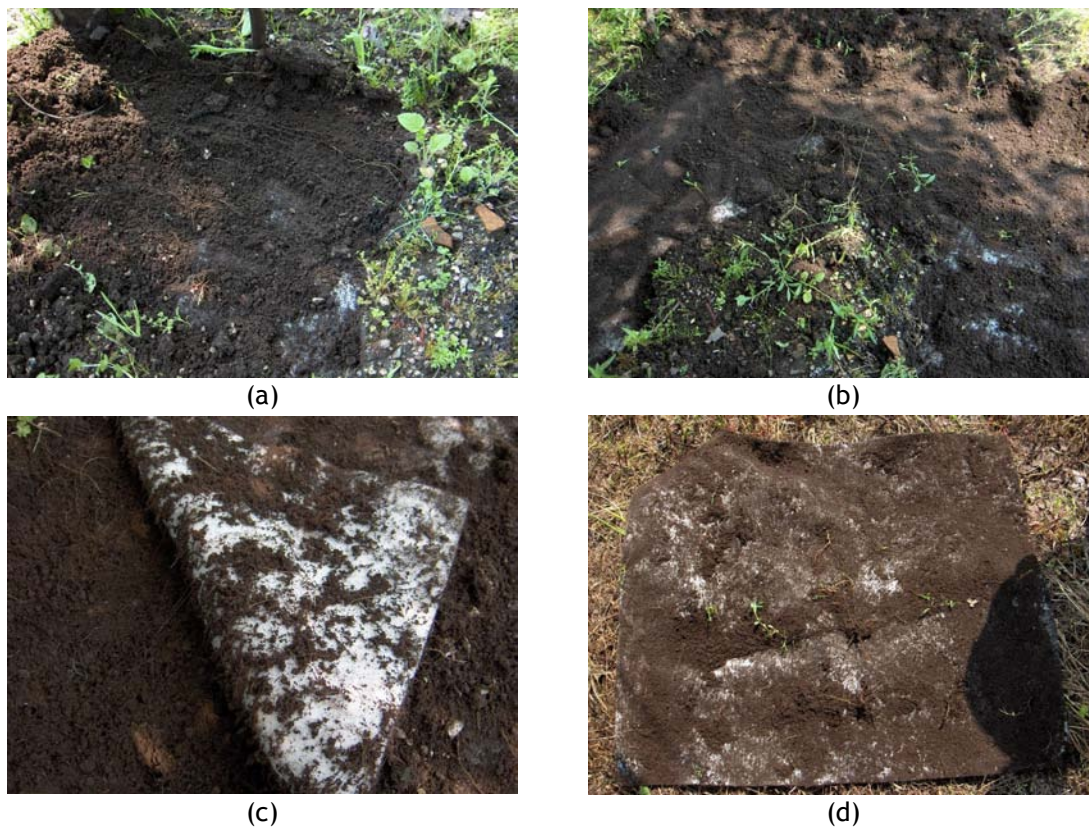


Figura 11.2 - Processo de exumação dos geotêxteis enterrados a 5 cm de profundidade:  
(a) e (b) remoção do solo; (c) remoção do geotêxtil; (d) aspecto do geotêxtil após a exumação.

Após o processo de exumação, os materiais foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz por um período mínimo de 7 dias (processo de secagem). Em seguida, foram preparados provetes com as dimensões adequadas para os ensaios de tracção-extensão (no mínimo 5 provetes) e de rasgamento (no mínimo 10 provetes). Os ensaios de tracção-extensão foram efectuados de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (método descrito no ponto 4.5) e os ensaios de rasgamento foram efectuados de acordo com a norma ASTM D4533 (método descrito no ponto 4.7).

O pH, o teor em água, o teor em matéria orgânica e o peso volúmico do solo foram caracterizados regularmente durante os 12 meses de exposição dos geotêxteis aos agentes do solo (entre Novembro de 2006 e Outubro de 2007). O pH do solo foi determinado de acordo com a especificação do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) E203 (1967) (Solos - Determinação do pH).

O teor em água do solo foi determinado de acordo com a norma ASTM D2974-07a (*Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils*). O método descrito na norma ASTM D2974 envolve a secagem de uma amostra de solo à temperatura de 105 °C. O teor em água do solo (em %) foi calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Teor em água (\%)} = \frac{m - m_{105\text{ °C}}}{m} \times 100 \quad (11.1)$$

em que  $m$  é a massa da amostra de solo (antes da secagem) e  $m_{105\text{ °C}}$  é a massa da amostra de solo após a secagem a 105 °C.

O teor em matéria orgânica do solo foi determinado por calcinação numa mufla a 500 °C (amostras do solo previamente secas a 105 °C) (método idêntico ao descrito na norma ASTM D2974). O teor em matéria orgânica do solo (em %) foi calculado através da seguinte equação:

$$\text{Matéria orgânica (\%)} = \frac{m_{105\text{ °C}} - m_{500\text{ °C}}}{m_{105\text{ °C}}} \times 100 \quad (11.2)$$

em que  $m_{500\text{ °C}}$  é a massa da amostra de solo após a calcinação a 500 °C e  $m_{105\text{ °C}}$  é a massa da amostra de solo após a secagem a 105 °C.

O peso volúmico do solo foi determinado de acordo com a norma ASTM D854-06e1 (*Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*). O peso volúmico do solo (expresso em  $\text{N.m}^{-3}$ ) é definido como o peso das partículas sólidas por unidade de volume.

O pH, o teor em água e o teor em matéria orgânica do solo foram determinados uma vez por mês ao longo dos 12 meses de exposição dos geotêxteis aos agentes do solo; o peso volúmico do solo foi determinado no início do ensaio, ao 4.º e ao 8.º mês de exposição. Os parâmetros anteriores foram determinados (pelo menos, em duplicado) para as amostras de solo recolhidas às profundidades de 5 cm e de 25 cm.

O Quadro 11.1 resume os valores obtidos do pH, do teor em água, do teor em matéria orgânica e do peso volúmico das amostras de solo recolhidas à profundidade de 5 cm. Do mesmo modo, os valores obtidos para as amostras de solo recolhidas a 25 cm de profundidade encontram-se no Quadro 11.2.



Quadro 11.1 - Resultados das análises às amostras de solo recolhidas a 5 cm de profundidade.

| Mês                                 | Nov.<br>2006 | Dez.<br>2006 | Jan.<br>2007 | Fev.<br>2007 | Mar.<br>2007 | Abr.<br>2007 | Mai.<br>2007 | Jun.<br>2007 | Jul.<br>2007 | Ago.<br>2007 | Set.<br>2007 | Out.<br>2007 |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| pH                                  | 5,64         | 5,54         | 5,40         | 5,59         | 4,90         | 5,10         | 5,00         | 5,36         | 5,52         | 5,44         | 5,37         | 5,32         |
| Teor em água (%)                    | 17,7         | 20,3         | 19,3         | 17,6         | 20,3         | 10,9         | 16,8         | 14,7         | 11,4         | 9,3          | 11,6         | 10,4         |
| Matéria orgânica (%)                | 10,1         | 9,3          | 7,6          | 9,0          | 9,3          | 9,4          | 8,6          | 8,2          | 8,8          | 9,1          | 8,9          | 9,0          |
| Peso volúmico (kN.m <sup>-3</sup> ) | 22,9         | ---          | ---          | 21,7         | ---          | ---          | ---          | 23,1         | ---          | ---          | ---          | ---          |

Quadro 11.2 - Resultados das análises às amostras de solo recolhidas a 25 cm de profundidade.

| Mês                                 | Nov.<br>2006 | Dez.<br>2006 | Jan.<br>2007 | Fev.<br>2007 | Mar.<br>2007 | Abr.<br>2007 | Mai.<br>2007 | Jun.<br>2007 | Jul.<br>2007 | Ago.<br>2007 | Set.<br>2007 | Out.<br>2007 |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| pH                                  | 5,45         | 5,50         | 5,35         | 5,59         | 4,97         | 5,18         | 5,02         | 5,39         | 5,46         | 5,46         | 5,18         | 5,35         |
| Teor em água (%)                    | 18,2         | 22,1         | 21,2         | 18,8         | 20,3         | 13,0         | 16,8         | 15,2         | 11,9         | 8,8          | 11,7         | 11,1         |
| Matéria orgânica (%)                | 8,5          | 9,0          | 8,7          | 8,3          | 8,7          | 7,4          | 6,9          | 9,6          | 9,0          | 8,4          | 7,9          | 8,4          |
| Peso volúmico (kN.m <sup>-3</sup> ) | 23,3         | ---          | ---          | 24,4         | ---          | ---          | ---          | 22,8         | ---          | ---          | ---          | ---          |

O solo possuía um pH ácido: pH entre os 4,90 e 5,64 a 5 cm de profundidade e entre os 4,97 e 5,59 a 25 cm de profundidade (valores de pH idênticos a 5 cm e a 25 cm de profundidade). O teor em água do solo variou entre os 9,3% e os 20,3% a 5 cm de profundidade e entre os 8,8% e os 22,1% a 25 cm de profundidade.

Por sua vez, o teor de matéria orgânica do solo variou entre 7,6% e 10,1% (a 5 cm de profundidade) e entre 6,9% e 9,6% (a 25 cm de profundidade). Por fim, o peso volúmico do solo variou entre os 21,7 kN.m<sup>-3</sup> e os 23,1 kN.m<sup>-3</sup> a 5 cm de profundidade e entre os 22,8 kN.m<sup>-3</sup> e os 24,4 kN.m<sup>-3</sup> a 25 cm de profundidade.

### 11.3 - Resultados experimentais

#### 11.3.1 - Avaliação visual

As amostras dos geotêxteis instaladas e recolhidas de imediato não possuíam danos visíveis. Após 6 meses de exposição, os geotêxteis também não tinham sinais visíveis de degradação. Os materiais enterrados a 5 cm de profundidade possuíam várias raízes de plantas (que cresceram à superfície do solo) entrelaçadas na sua estrutura. A quantidade de raízes existente nas amostras enterradas a 25 cm de profundidade era menor que a quantidade de raízes existente nas amostras colocadas a 5 cm de profundidade (as raízes existentes a 25 cm de profundidade não pertenciam às espécies vegetais que cresceram à superfície do solo, sendo por isso menos abundantes).



As Figuras 11.3 e 11.4 ilustram o aspecto do geotêxtil B0-280 após 6 meses de exposição aos agentes do solo às profundidades de 5 cm e 25 cm, respectivamente. Do mesmo modo, as Figuras 11.5 e 11.6 mostram, respectivamente, o aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 6 meses a 5 cm e a 25 cm de profundidade.

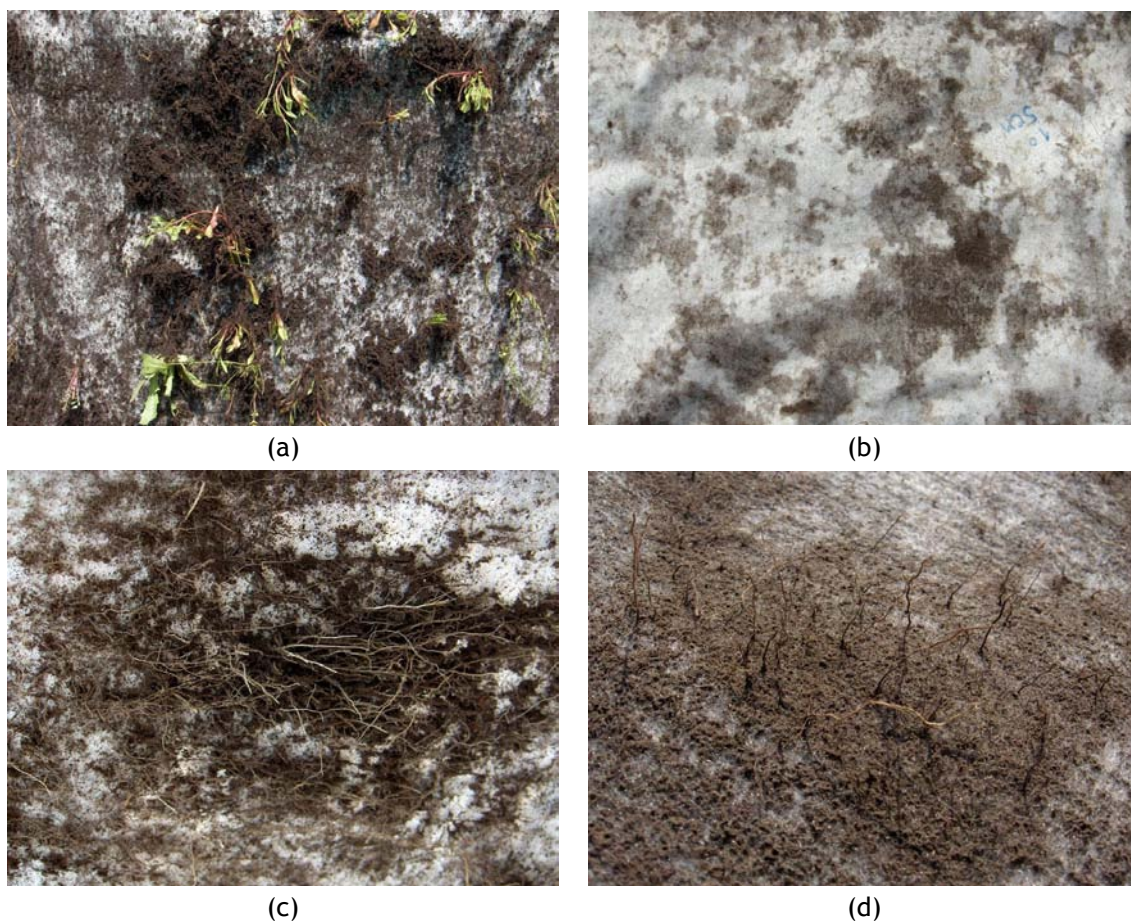


Figura 11.3 - Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 6 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo e da vegetação; (c) e (d) pormenor de algumas raízes existentes no material.



Figura 11.4 - Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 6 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo.



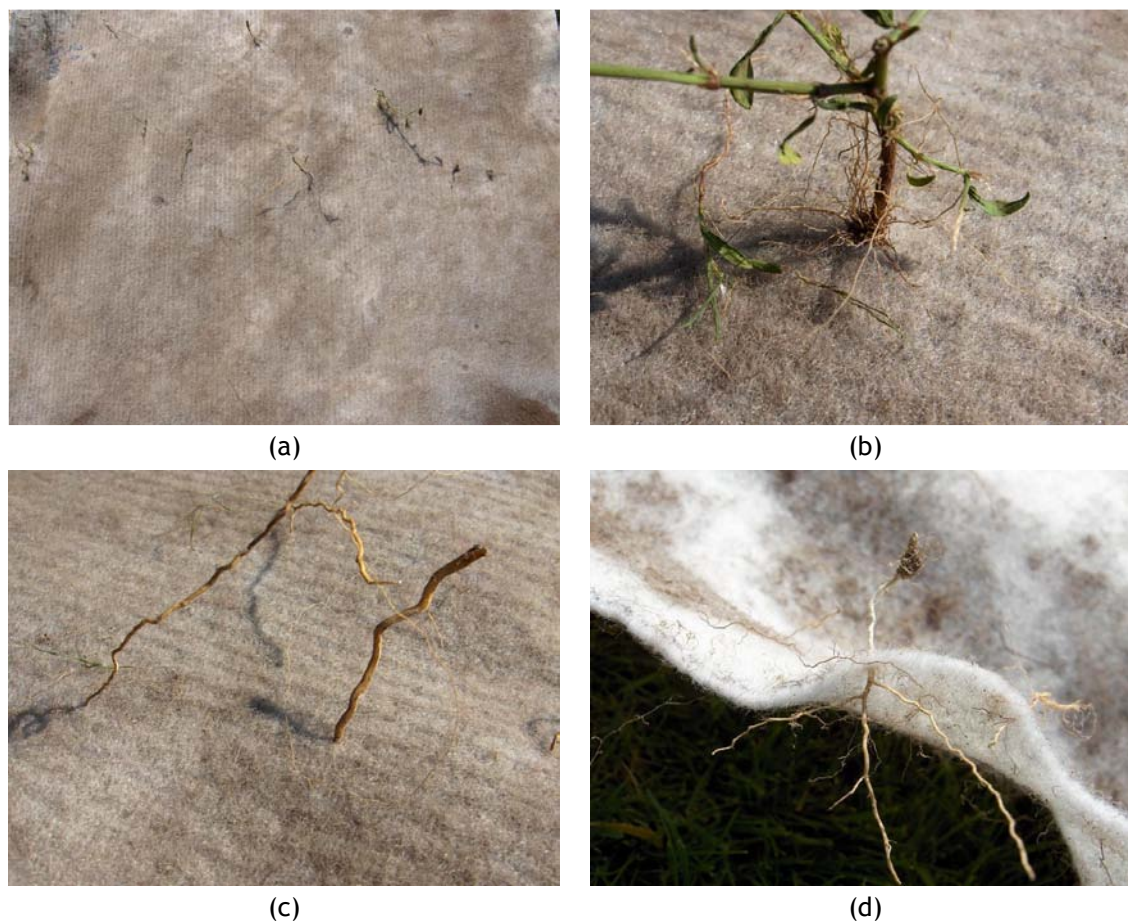


Figura 11.5 - Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 6 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo e da vegetação; (b) e (c) pormenor de algumas raízes; (d) pormenor de uma raiz que atravessou o material.

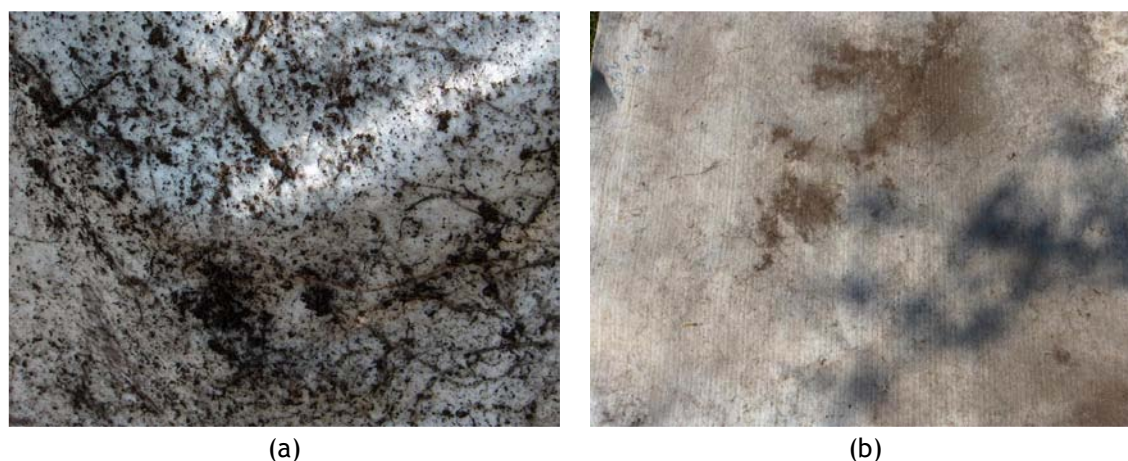


Figura 11.6 - Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 6 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo.

Após 12 meses de exposição aos agentes do solo, os geotêxteis B0-280 e B0-500 colocados a 5 cm e a 25 cm de profundidade não apresentavam danos visíveis (apenas possuíam várias raízes entrelaçadas na sua estrutura). A quantidade de raízes existente nas amostras colocadas a 25 cm de profundidade era muito maior após 12 meses de exposição do que ao fim de 6 meses de exposição aos agentes do solo.



As Figuras 11.7 e 11.8 ilustram o aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 12 meses a 5 cm e a 25 cm de profundidade, respectivamente. Por sua vez, o aspecto do geotêxtil B0-500 colocado durante 12 meses às profundidades de 5 cm e de 25 cm encontra-se ilustrado na Figura 10.9 e na Figura 10.10, respectivamente.



Figura 11.7 - Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 12 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a recolha; (b) após a remoção dos restos de solo e de alguma vegetação.



Figura 11.8 - Aspecto do geotêxtil B0-280 enterrado durante 12 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo; (b) pormenor de algumas raízes existentes no material.



Figura 11.9 - Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 12 meses a 5 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo e vegetação; (b) pormenor de uma raiz existente no material.





Figura 11.10 - Aspecto do geotêxtil B0-500 enterrado durante 12 meses a 25 cm de profundidade: (a) após a remoção dos restos de solo; (b) pormenor de uma raiz existente no material.

No solo localizado por debaixo de algumas amostras dos geotêxteis foram encontrados alguns túneis escavados por roedores ou por toupeiras (os materiais funcionaram como uma barreira, impedindo os animais de prosseguirem com a escavação dos seus túneis) (Figura 11.11). No entanto, não foram encontrados danos nos geotêxteis provocados pela acção dos animais (tais como, pequenos orifícios ou zonas roídas).



Figura 11.11 - Túneis escavados por roedores e/ou toupeiras no solo abaixo dos geotêxteis: (a) aspecto geral do solo após a exumação de um geotêxtil; (b) pormenor de um túnel.

### 11.3.2 - Ensaio de tracção-extensão

#### 11.3.2.1 - Geotêxtil B0-280

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm, encontram-se resumidos no Quadro 11.3. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual são apresentados no Quadro 11.4. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e após a exposição aos agentes do solo, estão ilustradas na Figura 11.12.

Quadro 11.3 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 13,8 (11%)                                   | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| Após instalação | 13,3 (5,8%)                                  | 115 (5,1%)                   | <b>96,4</b>              |
| 6 Meses         | 13,5 (7,5%)                                  | 101 (3,0%)                   | <b>97,8</b>              |
| 12 Meses        | 14,4 (7,6%)                                  | 106 (7,4%)                   | <b>104</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 11.4 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-----------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto         | 7,3   | 9,9   | 11,0   | 12,7   | 1053                            | ---                   |
| Após instalação | 4,2   | 6,8   | 9,2  | 11,7   | 951                             | <b>90,3</b>           |
| 6 Meses         | 5,1   | 8,5   | 12,7   | 16,3   | 887                             | <b>84,2</b>           |
| 12 Meses        | 4,4   | 8,3   | 13,6   | 17,4   | 1050                            | <b>99,7</b>           |

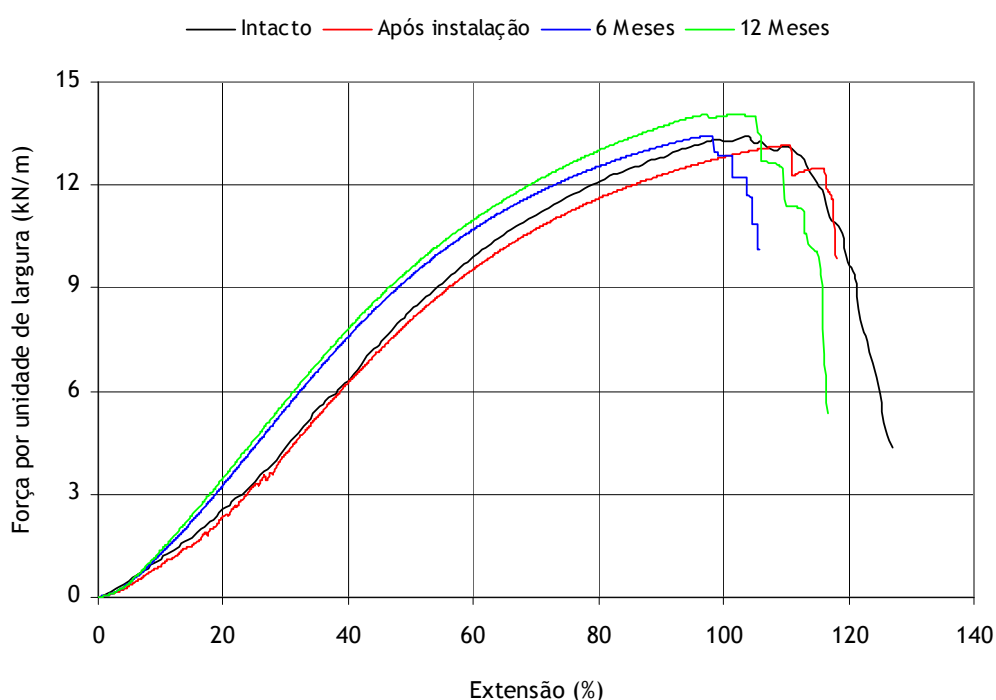


Figura 11.12 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 não sofreu alterações significativas durante a exposição aos agentes do solo a 5 cm de profundidade (resistências residuais de 97,8% aos 6 meses e de 104% ao fim de 12 meses). A respectiva extensão na força máxima também não sofreu grandes alterações (apenas uma pequena diminuição).

Os processos de instalação a 5 cm de profundidade e exumação (imediate) originaram uma pequena diminuição da robustez do geotêxtil B0-280 (robustez residual de 90,3%). Ao fim de 6 e 12 meses de exposição, à mesma profundidade, o geotêxtil B0-280 possuía uma robustez residual de 84,2% e de 99,7%, respectivamente.

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-280, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo a 25 cm de profundidade, encontram-se resumidas nos Quadros 11.5 e 11.6. As respectivas curvas médias força-extensão estão representadas na Figura 11.13.

Quadro 11.5 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 13,8 (11%)                                  | 113 (6,8%)                   | ---                      |
| Após instalação | 13,3 (3,3%)                                 | 117 (7,1%)                   | <b>96,4</b>              |
| 6 Meses         | 13,9 (6,5%)                                 | 103 (5,4%)                   | <b>101</b>               |
| 12 Meses        | 13,3 (4,5%)                                 | 114 (5,1%)                   | <b>96,4</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 11.6 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 20% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-----------------|---|---|--|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto         | 7,3                                       | 9,9                                       | 11,0                                       | 12,7                                       | 1053                           | ---                   |
| Após instalação | 3,3                                       | 5,4                                       | 8,5  | 10,9                                       | 924                            | <b>87,7</b>           |
| 6 Meses         | 5,5                                       | 9,2                                       | 13,0                                       | 16,5                                       | 873                            | <b>82,9</b>           |
| 12 Meses        | 4,9                                       | 8,3                                       | 12,1                                       | 15,0                                       | 1006                           | <b>95,5</b>           |

A resistência à tracção do geotêxtil B0-280 também não sofreu alterações muito significativas após a exposição aos agentes do solo a 25 cm de profundidade (resistência residual de 101% após 6 meses e resistência residual de 96,4% ao fim de 12 meses). A respectiva extensão na força máxima também não sofreu grandes variações; após 12 meses de exposição, o geotêxtil B0-280 possuía uma extensão na força máxima (114%) idêntica ao valor original (113%).

Os processos de instalação a 25 cm e de exumação (imediate) provocaram uma pequena redução da robustez do geotêxtil B0-280 (robustez residual de 87,7%). Após 6 e 12 meses enterrado a 25 cm de profundidade, a robustez do material era de 82,9% e de 95,5%, respectivamente.

De um modo geral, a exposição do geotêxtil B0-280 aos agentes do solo (por um período máximo de 12 meses) não provocou grandes alterações nas suas propriedades mecânicas (resistência à tracção, extensão na força máxima, rigidez secante e robustez). Assim, o geotêxtil B0-280 apresentou uma boa resistência aos vários agentes do solo (a 5 cm e a 25 cm de profundidade).

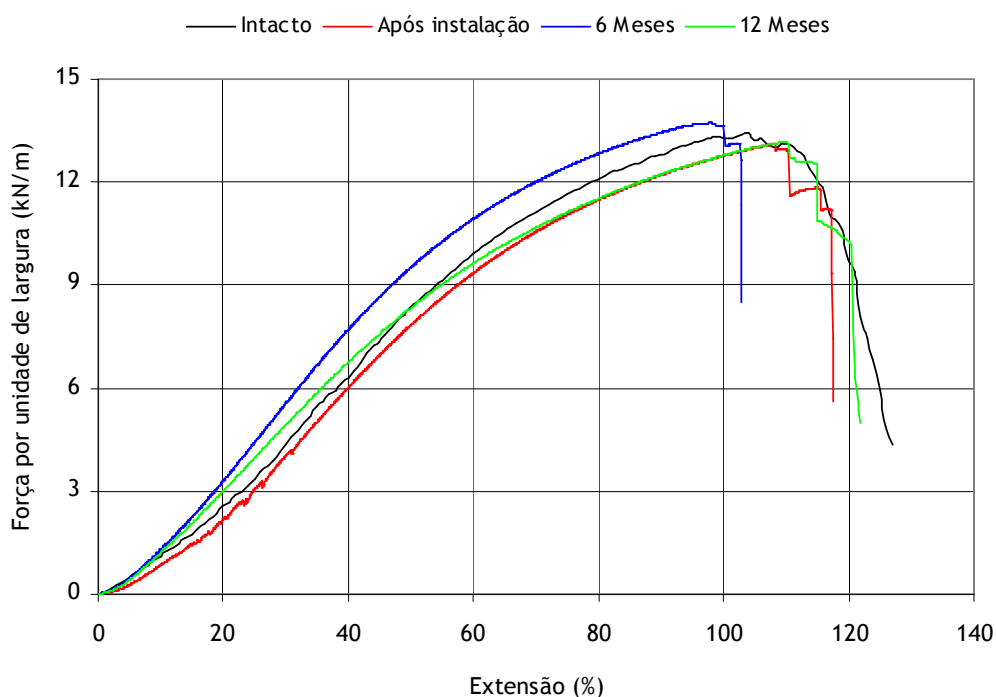


Figura 11.13 - Curvas médias força-estiramento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

### 11.3.2.2 - Geotêxtil B0-500

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500, determinadas antes e após a exposição aos agentes do solo a 5 cm de profundidade, encontram-se resumidas nos Quadros 11.7 e 11.8. As respectivas curvas médias força-estiramento estão ilustradas na Figura 11.14.

Quadro 11.7 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 25,6 (11%)                                   | 136 (12%)                    | ---                      |
| Após instalação | 25,7 (9,5%)                                  | 132 (8,7%)                   | <b>100</b>               |
| 6 Meses         | 24,9 (5,6%)                                  | 140 (5,0%)                   | <b>97,3</b>              |
| 12 Meses        | 24,9 (6,2%)                                  | 132 (4,7%)                   | <b>97,3</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 11.8 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 20\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|-----------------|---|---|--|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto         | 13,8  | 26,2  | 33,6   | 36,4   | 2382                            | ---                   |
| Após instalação | 21,6  | 29,2  | 36,1   | 38,4   | 2123                            | <b>89,1</b>           |
| 6 Meses         | 17,3  | 22,7  | 28,0   | 31,8   | 2248                            | <b>94,4</b>           |
| 12 Meses        | 19,9  | 29,3  | 34,5   | 36,3   | 2239                            | <b>94,0</b>           |

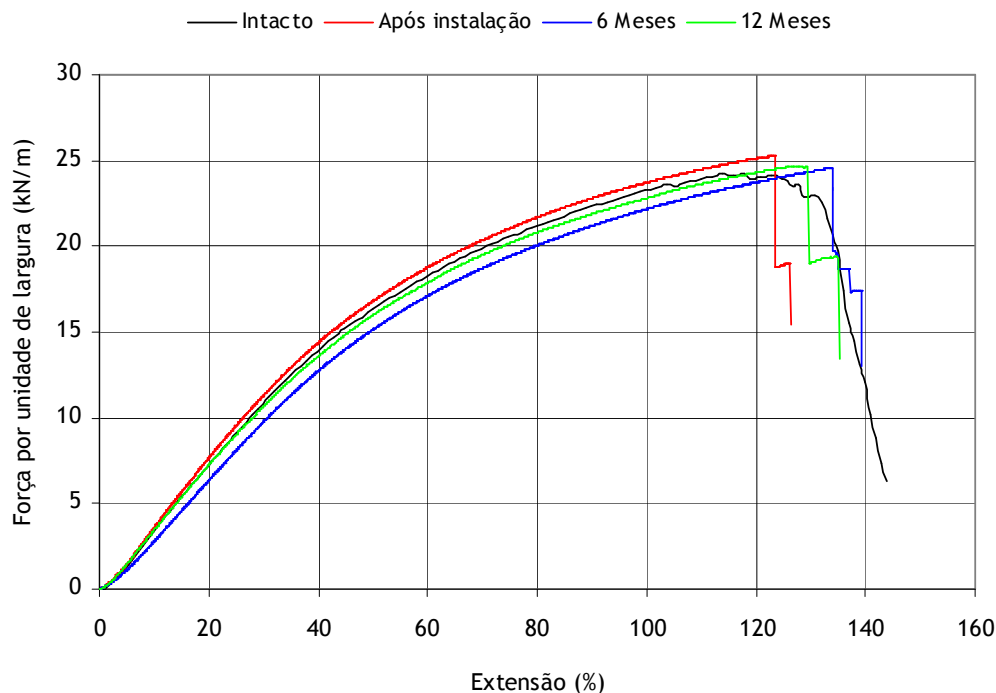


Figura 11.14 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

A exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm não causou alterações muito significativas na resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistência residual de 97,3% ao fim de 6 e 12 meses de exposição). A respectiva extensão na força máxima também não sofreu grandes variações.

Por sua vez, a robustez do geotêxtil B0-500 também não sofreu grandes alterações. De facto, ao fim de 12 meses enterrado a 5 cm de profundidade, o material ainda possuía uma robustez residual de 94,0% (curiosamente, ligeiramente maior que a robustez residual após os processos de instalação e de exumação - apenas 89,1%).

As propriedades mecânicas do geotêxtil B0-500, obtidas antes e após 6 e 12 meses de exposição aos agentes do solo a 25 cm de profundidade, encontram-se nos Quadros 11.9 e 11.10; as curvas médias força-extensão correspondentes estão representadas na Figura 11.15.

Quadro 11.9 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-----------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 25,6 (11%)                                   | 136 (12%)                    | ---                      |
| Após instalação | 25,2 (3,7%)                                  | 140 (5,0%)                   | <b>98,4</b>              |
| 6 Meses         | 23,9 (3,9%)                                  | 145 (4,0%)                   | <b>93,4</b>              |
| 12 Meses        | 24,3 (7,6%)                                  | 124 (13%)                    | <b>94,9</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



Quadro 11.10 - Rigidez secante, robustez e robustez residual do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | $J_{SEC} 2\%$<br>( $kN.m^{-1}$ ) | $J_{SEC} 5\%$<br>( $kN.m^{-1}$ ) | $J_{SEC} 10\%$<br>( $kN.m^{-1}$ ) | $J_{SEC} 20\%$<br>( $kN.m^{-1}$ ) | Robustez<br>( $kN.m^{-1}$ ) | Robustez<br>residual (%) |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 13,8                             | 26,2                             | 33,6                              | 36,4                              | 2382                        | ---                      |
| Após instalação | 20,3                             | 25,9                             | 32,0                              | 34,6                              | 2400                        | <b>101</b>               |
| 6 Meses         | 15,5                             | 20,5                             | 25,2                              | 28,8                              | 2284                        | <b>95,9</b>              |
| 12 Meses        | 27,6                             | 35,8                             | 39,7                              | 40,1                              | 2155                        | <b>90,5</b>              |

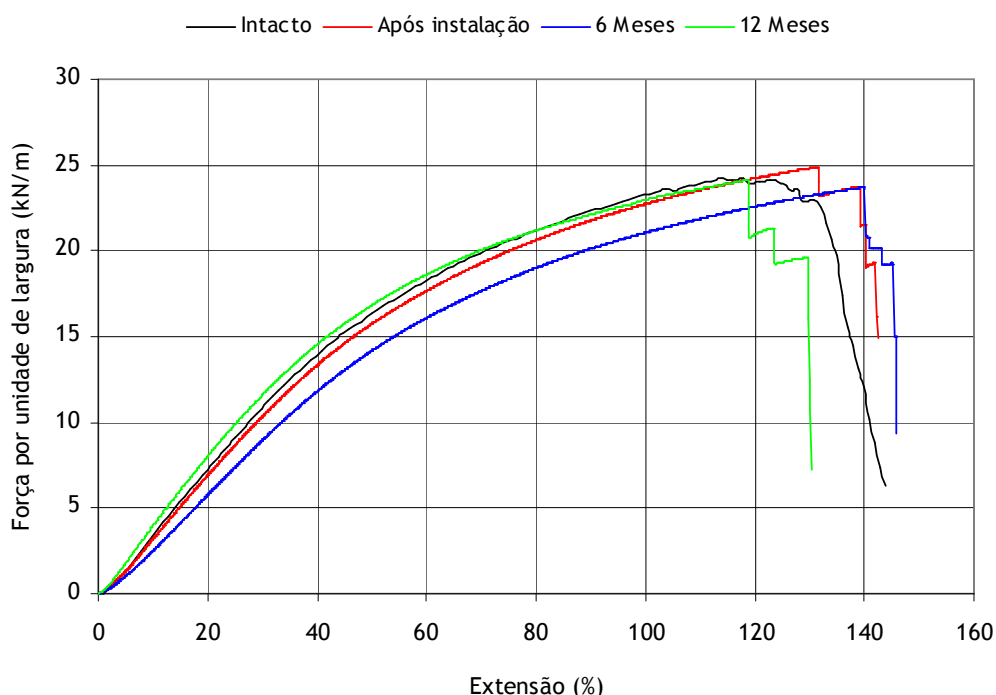


Figura 11.15 - Curvas médias força-extensão do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

A exposição aos agentes do solo a 25 cm de profundidade durante 6 e 12 meses não causou grandes alterações na resistência à tracção do geotêxtil B0-500 (resistências residuais de 93,4% e de 94,9%, respectivamente). A extensão na força máxima sofreu algumas variações: aos 6 meses de exposição era de 145%, ao passo que, após 12 meses de exposição, possuía um valor de 124% (valor original de 136%).

A robustez do geotêxtil B0-500 não sofreu alterações muito grandes após a exposição aos agentes do solo a 25 cm de profundidade. De facto, ao fim de 6 e 12 meses de exposição, o material possuía uma robustez residual de 95,9% e de 90,5%, respectivamente.

De um modo geral, e tal como para o geotêxtil B0-280, a exposição do geotêxtil B0-500 aos agentes do solo (por um período máximo de 12 meses) também não provocou alterações muito significativas nas suas propriedades mecânicas (resistência à tracção, extensão na força máxima, rigidez secante e robustez). Assim, o geotêxtil B0-500 também apresentou uma boa resistência à acção dos diversos agentes do solo a 5 cm e a 25 cm de profundidade.

### 11.3.3 - Ensaios de rasgamento

#### 11.3.3.1 - Geotêxtil B0-280

Os valores da resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280, determinados antes e após a exposição aos agentes do solo a 5 cm e a 25 cm de profundidade, encontram-se resumidos nos Quadros 11.11 e 11.12, respectivamente.

Quadro 11.11 - Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | Resistência ao rasgamento (N) | Resistência residual (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 395 (16%)                     | ---                      |
| Após instalação | 351 (13%)                     | <b>88,9</b>              |
| 6 Meses         | 345 (16%)                     | <b>87,3</b>              |
| 12 Meses        | 352 (18%)                     | <b>89,1</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 11.12 - Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | Resistência ao rasgamento (N) | Resistência residual (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 395 (16%)                     | ---                      |
| Após instalação | 342 (7,1%)                    | <b>86,6</b>              |
| 6 Meses         | 346 (12%)                     | <b>87,6</b>              |
| 12 Meses        | 340 (15%)                     | <b>86,1</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Os processos de instalação (a 5 e a 25 cm de profundidade) e exumação (imediata) provocaram uma ligeira diminuição da resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-280 (resistências residuais de 88,9% e de 86,6%, respectivamente). A exposição aos agentes do solo (durante 6 e 12 meses) não originou uma diminuição adicional da resistência ao rasgamento. De facto, as resistências ao rasgamento dos provetes enterrados durante 6 e 12 meses eram idênticas às dos provetes instalados e exumados de imediato.

#### 11.3.3.2 - Geotêxtil B0-500

Os valores da resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500, obtidos antes e após a exposição aos agentes do solo, encontram-se resumidos nos Quadros 10.13 (5 cm de profundidade) e 10.14 (25 cm de profundidade).

Os processos de instalação e exumação também originaram uma ligeira diminuição da resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500 (resistências residuais de 88,0% e 90,4% para os provetes instalados a 5 e a 25 cm de profundidade, respectivamente).

Quadro 11.13 - Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 5 cm.

| Tempo           | Resistência ao rasgamento (N) | Resistência residual (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 615 (16%)                     | ---                      |
| Após instalação | 541 (14%)                     | <b>88,0</b>              |
| 6 Meses         | 452 (6,7%)                    | <b>73,5</b>              |
| 12 Meses        | 460 (18%)                     | <b>74,8</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 11.14 - Resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes do solo à profundidade de 25 cm.

| Tempo           | Resistência ao rasgamento (N) | Resistência residual (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Intacto         | 615 (16%)                     | ---                      |
| Após instalação | 556 (9,5%)                    | <b>90,4</b>              |
| 6 Meses         | 458 (15%)                     | <b>74,5</b>              |
| 12 Meses        | 435 (8,1%)                    | <b>70,7</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Ao contrário do geotêxtil B0-280, a exposição aos agentes do solo (a 5 e a 25 cm de profundidade) originou uma diminuição adicional da resistência ao rasgamento do geotêxtil B0-500. De facto, após 6 meses de exposição, o material possuía resistências residuais de 73,5% (a 5 cm) e de 74,5% (a 25 cm). O aumento do tempo de exposição dos 6 para os 12 meses não provocou grandes alterações na resistência ao rasgamento: resistências residuais de 74,8% (a 5 cm) e de 70,7% (a 25 cm) ao fim de 12 meses de exposição.

#### 11.4 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se à avaliação da resistência dos geotêxteis aos vários agentes de um solo húmido (materiais enterrados a 5 cm e 25 cm de profundidade, durante um período máximo de 12 meses). De um modo geral, os geotêxteis apresentaram uma boa resistência à degradação causada pelos agentes do solo. Assim, a durabilidade dos geotêxteis de PP (materiais não estabilizados) não foi muito afectada pela exposição aos vários agentes do solo (os danos ocorridos nos materiais foram mínimos em comparação, por exemplo, com a exposição aos agentes climáticos reais).



## **PARTE III**

### **Capítulo 12**

Resistência de georredes de polietileno de alta densidade  
a agentes de degradação químicos

### **Capítulo 13**

Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade  
a agentes de degradação químicos



# CAPÍTULO 12

## Resistência de georredes de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos

### 12.1 - Introdução

Os geossintéticos aplicados em Engenharia Civil podem estar permanentemente expostos à acção de vários agentes de degradação físicos ou químicos (espécies químicas como ácidos ou bases, oxigénio atmosférico, temperaturas elevadas, agentes climatéricos, entre outros) que podem afectar o seu desempenho e provocar uma diminuição da sua durabilidade. Assim, é muito importante avaliar a resistência dos materiais aos vários agentes de degradação físicos e/ou químicos.

Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência de georredes de polietileno de alta densidade (especialmente fabricadas com diferentes composições químicas) a diversos agentes de degradação químicos. As georredes foram imersas em soluções ácidas e alcalinas, expostas à termo-oxidação (método do forno e novo método com elevada pressão de O<sub>2</sub>) e expostas aos agentes climatéricos (simulação laboratorial e exposição sob condições reais).

### 12.2 - Georredes

Neste trabalho, foram estudadas cinco georredes de PEAD produzidas por uma empresa nacional (a Guerner & Irmãos S.A., Vila Nova de Gaia). As georredes possuíam diferentes composições químicas: com ou sem o aditivo T783 e vários pigmentos de cor (pigmento preto - negro de carbono; pigmento verde - uma ftalocianina de cobre); o T783 é uma mistura dos aditivos C944 e T622 (as principais características do C944, do T622, do negro de carbono e das ftalocianinas de cobre foram descritas no ponto 3.4). As principais características das georredes produzidas estão resumidas nos Quadros 12.1 e 12.2 (informações fornecidas pelo fabricante).

Quadro 12.1 - Características comuns a todas as georredes de PEAD.

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| Teia                      | 46 g.m <sup>-2</sup> |
| Trama                     | 39 g.m <sup>-2</sup> |
| Massa por unidade de área | 85 g.m <sup>-2</sup> |
| Diâmetro do filamento     | 0,28 mm              |
| Massa linear              | 540 denier           |
| Abertura da malha         | 1,10 x 1,60 mm       |

Quadro 12.2 - Composição química das georredes de PEAD.

| Georredes | Cor    | T783<br>(% em massa) | Negro de carbono<br>(% em massa) | Pigmento verde<br>(% em massa) | PEAD<br>(% em massa) |
|-----------|--------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| B0        | Branca | 0                    | 0                                | 0                              | 100                  |
| B2        | Branca | 0,22                 | 0                                | 0                              | 99,78                |
| P0        | Preta  | 0                    | 1,05                             | 0                              | 98,95                |
| P2        | Preta  | 0,16                 | 1,05                             | 0                              | 98,79                |
| V0        | Verde  | 0                    | 0                                | 1,10                           | 98,90                |

A cada georrede foi atribuída uma designação única de modo a permitir uma identificação simples e inequívoca dos diferentes materiais. As designações atribuídas são formadas por uma letra (*B*, *P* ou *V*) e por um número (0 ou 2): as letras *B*, *P* ou *V* indicam qual a cor das georredes (branca, preta ou verde) e os números 0 e 2 indicam a quantidade do aditivo T783 (0% ou cerca de 0,2%) presente nos materiais. Por exemplo, a designação P2 significa que a georrede é preta (possui negro de carbono) e possui cerca de 0,2% de T783.

As georredes foram fabricadas em grandes quantidades (embora os materiais tenham sido fabricados unicamente para fins de investigação, o seu processo de fabrico foi totalmente idêntico ao processo de fabrico para fins comerciais) e foram fornecidas ao LGS da FEUP sob a forma de rolos. A Figura 12.1 ilustra o aspecto das georredes (o aspecto da georrede B2 é igual ao da georrede B0; do mesmo modo, o aspecto da georrede P2 é igual ao da georrede P0).

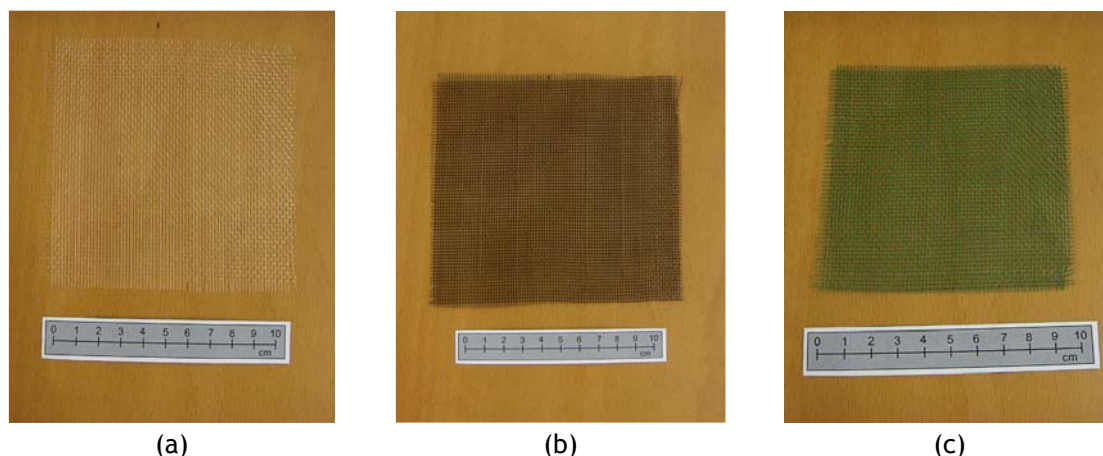


Figura 12.1 - Georredes de PEAD produzidas: (a) georrede B0; (b) georrede P0; (c) georrede V0.

A amostragem e a preparação dos provetes foram efectuadas, sempre que possível, de acordo com as orientações descritas na norma NP EN ISO 9862:2007 (Geossintéticos: Amostragem e preparação de provetes). Em termos gerais, os processos de amostragem e preparação dos provetes das várias georredes foram idênticos aos processos anteriormente descritos para os geotêxteis (ponto 5.4). Os provetes foram cortados na direcção de fabrico e possuíam dimensões superiores às necessárias para os ensaios de caracterização (tracção-extensão) (os provetes podem desfiar durante a exposição aos vários agentes de degradação e, caso fossem logo cortados com as dimensões exactas, podiam ficar com dimensões impróprias para os ensaios futuros de tracção-extensão).



### 12.3 - Avaliação da danificação sofrida pelas georredes

A danificação sofrida pelas georredes durante a exposição aos diferentes agentes de degradação foi avaliada através de ensaios mecânicos de tracção-extensão: os resultados obtidos para os provetes expostos foram comparados com os resultados obtidos para os provetes de referência (intactos, sem nenhum tipo de degradação). Os ensaios de tracção-extensão foram realizados segundo a norma NP EN ISO 13934-1:2001 (Têxteis - Propriedades de tracção dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira).

A norma NP EN ISO 13934-1 descreve uma metodologia para determinar as características mecânicas de tecidos (este método de ensaio é principalmente aplicado a materiais tecidos que possuam teia e trama). Os ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 13934-1 são muito idênticos aos ensaios de acordo com a norma NP EN 29073-3 (descrição no ponto 4.6). O Quadro 12.3 resume as principais características dos ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 13934-1.

Quadro 12.3 - Condições experimentais dos ensaios de tracção-extensão (NP EN ISO 13934-1).

| Largura <small>Proвете</small> | Comprimento <small>Proвете *</small> | n <small>Provetes **</small> | Velocidade               |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 50 ± 0,5 mm                    | 200 mm                               | 5                            | 100 mm.min <sup>-1</sup> |

(\*comprimento definido pela distância entre garras; \*\*número mínimo)

Os equipamentos usados nos ensaios de tracção-extensão das georredes (segundo a norma NP EN ISO 13934-1) foram os mesmos utilizados para os ensaios de tracção-extensão dos geotêxteis de acordo com as normas NP EN ISO 10319 e NP EN 29073-3 (descrição dos equipamentos no ponto 4.5.2).

Os provetes das georredes foram fixados com as garras de compressão hidráulica (alternativamente, poderiam ter sido usadas as garras de compressão pneumática ou as garras em cunha metálica). Nas zonas de fixação dos provetes foram colados pedaços de geotêxteis para a evitar o deslizamento das georredes nas garras (a pequena espessura das georredes impede o aprisionamento dos provetes nas garras, sendo a colagem de pedaços de geotêxteis indispensável para a fixação dos provetes).

A norma NP EN ISO 13934-1 refere como resultados do ensaio de tracção-extensão os valores médios da força máxima (em N) e da extensão na força máxima (em %). No entanto, a partir da informação obtida durante o ensaio de tracção-extensão (pares de valores força-extensão) segundo a norma NP EN ISO 13934-1, é também possível determinar os mesmos parâmetros mecânicos determinados para os ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319 (ponto 4.5.4).

O tratamento dos dados obtidos nos ensaios de tracção-extensão das georredes (NP EN ISO 13934-1) foi igual ao tratamento descrito no Capítulo 4 para os ensaios de tracção-extensão dos geotêxteis de acordo com as normas NP EN ISO 10319 e NP EN 29073-3 (pontos 4.5 e 4.6). Assim, os resultados dos ensaios de tracção-extensão das georredes incluem os valores da resistência à tracção, da extensão na força máxima, da rigidez secante (determinada às extensões de 2%, 5% e 10%) e da robustez. Em seguida, apresentam-se os resultados da caracterização mecânica das georredes antes da exposição aos vários agentes de degradação (amostras de referência).

## 12.4 - Caracterização mecânica das amostras de referência das georredes

O Quadro 12.4 resume os valores médios da resistência à tracção e da extensão na força máxima das amostras de referência das várias georredes, bem como os respectivos coeficientes de variação; os valores da rigidez secante (determinados às extensões de 2%, 5% e 10%) e da robustez encontram-se no Quadro 12.5. Os resultados apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 10 provetes intactos de cada uma das georredes (provetes ensaiados na direcção de fabrico).

Quadro 12.4 - Resistência à tracção e extensão na força máxima das amostras intactas das georredes (NP EN ISO 13934-1) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Georrede | Resistência à tracção<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força<br>máxima (%) |
|----------|--|---------------------------------|
| B0       | 12,7 (2,6%)                                    | 21,4 (5,8%)                     |
| B2       | 13,3 (2,6%)                                    | 22,6 (7,5%)                     |
| P0       | 12,7 (2,2%)                                    | 22,6 (6,8%)                     |
| P2       | 13,0 (5,7%)                                    | 22,9 (5,9%)                     |
| V0       | 13,6 (1,8%)                                    | 23,8 (8,9%)                     |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.5 - Rigidez secante (a 2%, 5% e 10%) e robustez das amostras intactas das georredes (NP EN ISO 13934-1) (valores determinados na direcção de fabrico).

| Georrede | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) |
|----------|--|--|---|-----------------------------------|
| B0       | 104  | 89,9   | 83,0  | 291                               |
| B2       | 104  | 91,4   | 84,8  | 377                               |
| P0       | 96,7   | 87,7   | 82,3  | 320                               |
| P2       | 89,4   | 83,8   | 79,3  | 339                               |
| V0       | 74,0   | 74,2   | 73,2  | 323                               |

As georredes possuíam resistências à tracção idênticas (valores entre os 12,7 e os 13,6 kN.m<sup>-1</sup>); os coeficientes de variação obtidos foram relativamente baixos, situando-se entre os 1,8% e os 5,7%. As extensões na força máxima das diferentes georredes também foram idênticas entre si (valores entre os 21,4% e os 23,8%); os coeficientes de variação obtidos para a extensão na força máxima (entre os 5,8% e os 8,9%) foram superiores aos coeficientes de variação obtidos para a resistência à tracção.

De um modo geral, as georredes possuíam valores de rigidez secante semelhantes (a maior excepção ocorreu para a georrede V0, que era menos rígida do que as restantes georredes). A rigidez secante das georredes B0, B2, P0 e P2 diminuiu com o aumento da extensão (comparando os valores obtidos às extensões de 2%, 5% e 10%); a rigidez secante da georrede V0 não sofreu grandes alterações com o aumento da extensão (os valores determinados a 2%, a 5% e a 10% de extensão eram idênticos). As diferentes georredes apresentavam uma robustez semelhante (valores entre os 291 e os 377 kN.m<sup>-1</sup>). A Figura 12.2 compara as curvas médias força-extensão obtidas para as diferentes georredes.

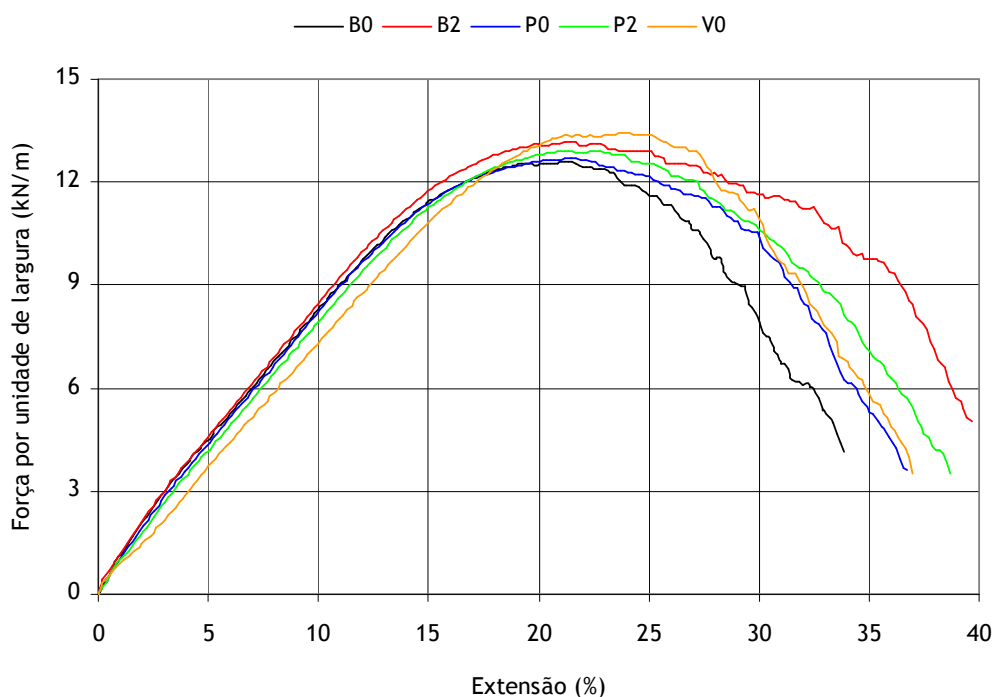


Figura 12.2 - Curvas médias força-extensão obtidas para as diferentes georredes (provetes ensaiados na direcção de fabrico) (NP EN ISO 13934-1).

## 12.5 - Determinação da resistência das georredes a soluções ácidas e alcalinas

### 12.5.1 - Descrição experimental

As georredes foram imersas numa solução ácida (ácido sulfúrico) e numa solução alcalina (hidróxido de sódio) durante 28 dias a 90 °C (Quadro 12.6); os ensaios de imersão foram apenas realizados para as georredes B0 e B2.

Quadro 12.6 - Condições experimentais dos ensaios de imersão das georredes.

| Ensaio de imersão | Agente de degradação  | Condições do ensaio |
|-------------------|---|---------------------|
| Meio ácido*       | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH < 1,0) | 90 °C, 28 dias      |
| Meio alcalino**   | NaOH (0,5 mol.L <sup>-1</sup> )<br>(pH > 13,0)                          | 90 °C, 28 dias      |

(\*corresponde ao meio ácido V do Capítulo 6; \*\*corresponde ao meio alcalino V do Capítulo 6)

Após a imersão, os provetes foram lavados (com água desionizada) para remover restos das soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio e foram secos, por um período mínimo de 7 dias, em local seco e ao abrigo da luz. Em seguida, foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 13934-1 (este método de ensaio encontra-se descrito no ponto 12.3).

Os ensaios de imersão das georredes foram realizados num banho termostático (marca *GFL*, modelo 1003) (a descrição deste equipamento encontra-se no ponto 6.2.1). As características dos reagentes usados para a preparação das soluções de imersão podem também ser encontradas no ponto 6.2.1.

### 12.5.2 - Georrede B0

O Quadro 12.7 resume os valores da resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e depois das imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 12.8. As curvas médias força-extensão da georrede B0, obtidas antes e após os ensaios de imersão, estão ilustradas na Figura 12.3.

Quadro 12.7 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 12,7 (2,6%)                                 | 21,4 (5,8%)                  | ---                      |
| Meio ácido        | 14,1 (3,1%)                                 | 32,6 (10%)                   | <b>111</b>               |
| Meio alcalino     | 14,0 (1,8%)                                 | 33,6 (6,7%)                  | <b>110</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.8 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 104                                       | 89,9                                      | 83,0                                       | 291                            | ---                   |
| Meio ácido        | 67,2                                      | 66,7                                      | 61,8                                       | 441                            | <b>152</b>            |
| Meio alcalino     | 95,7                                      | 74,8                                      | 65,1                                       | 460                            | <b>158</b>            |

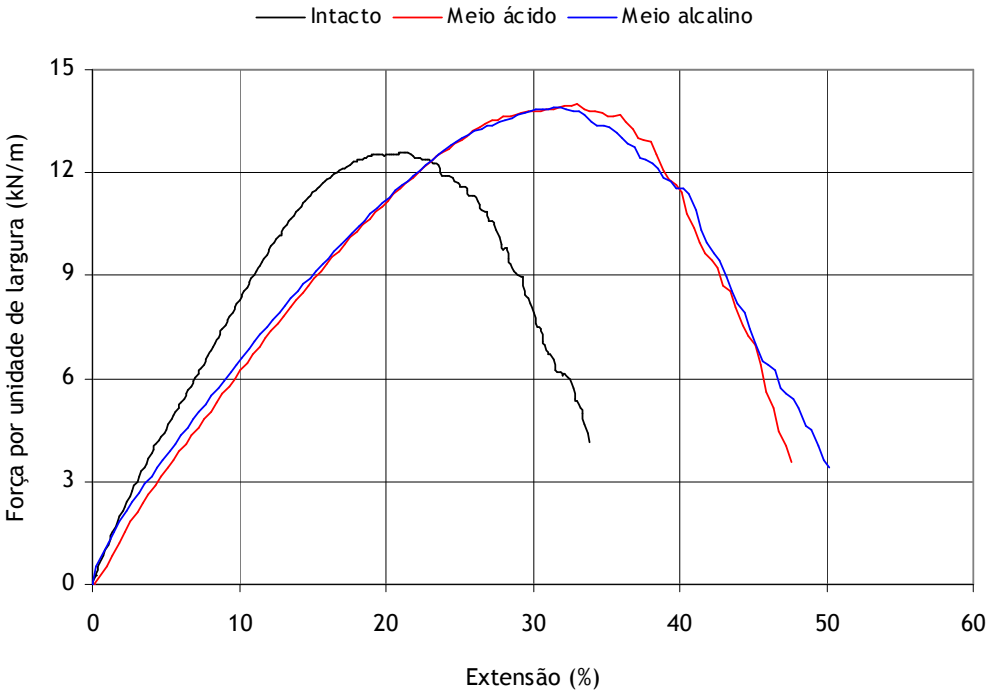


Figura 12.3 - Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

A resistência à tracção da georrede B0 aumentou ligeiramente após as imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio (resistências residuais de 111% e 112%, respectivamente). A extensão na força máxima também sofreu um aumento depois das imersões em ácido sulfúrico (de 21,4% para 32,6%) e em hidróxido de sódio (de 21,4% para 33,6%).

A rigidez secante da georrede B0 (a 2%, 5% e 10% de extensão) diminuiu após as imersões em meio ácido e em meio alcalino (materiais mais deformáveis). Por sua vez, a robustez sofreu um aumento depois das imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio (robustez residual de 152% e 158%, respectivamente).

De um modo geral, a georrede B0 (não estabilizada) apresentou uma boa resistência aos ensaios de imersão em meio ácido e em meio alcalino (a resistência à tracção, a extensão na força máxima e a robustez aumentaram). Os resultados obtidos após a imersão em ácido sulfúrico foram idênticos aos resultados obtidos depois da imersão em hidróxido de sódio.

### 12.5.3 - Georrede B2

As propriedades mecânicas da georrede B2, antes e após os ensaios de imersão em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio, estão resumidas nos Quadros 12.9 e 12.10. As curvas médias força-extensão correspondentes encontram-se representadas na Figura 12.4.

Quadro 12.9 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|-------------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto           | 13,3 (2,6%)                                 | 22,6 (7,5%)                  | ---                      |
| Meio ácido        | 13,1 (3,6%)                                 | 36,3 (7,1%)                  | <b>98,5</b>              |
| Meio alcalino     | 13,1 (0,9%)                                 | 37,4 (12%)                   | <b>98,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.10 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|-------------------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto           | 104                                       | 91,4                                      | 84,8                                       | 377                            | ---                   |
| Meio ácido        | 77,7                                      | 68,7                                      | 60,3                                       | 639                            | <b>169</b>            |
| Meio alcalino     | 74,4                                      | 68,5                                      | 60,7                                       | 612                            | <b>162</b>            |

A resistência à tracção da georrede B2 não sofreu grandes alterações depois dos ensaios de imersão em meio ácido e em meio alcalino (resistência residual de 98,5% em ambos os casos). A extensão na força máxima aumentou após as imersões em ácido sulfúrico (aumento de 22,6% para 36,3%) e em hidróxido de sódio alcalino (aumento de 22,6% para 37,4%).

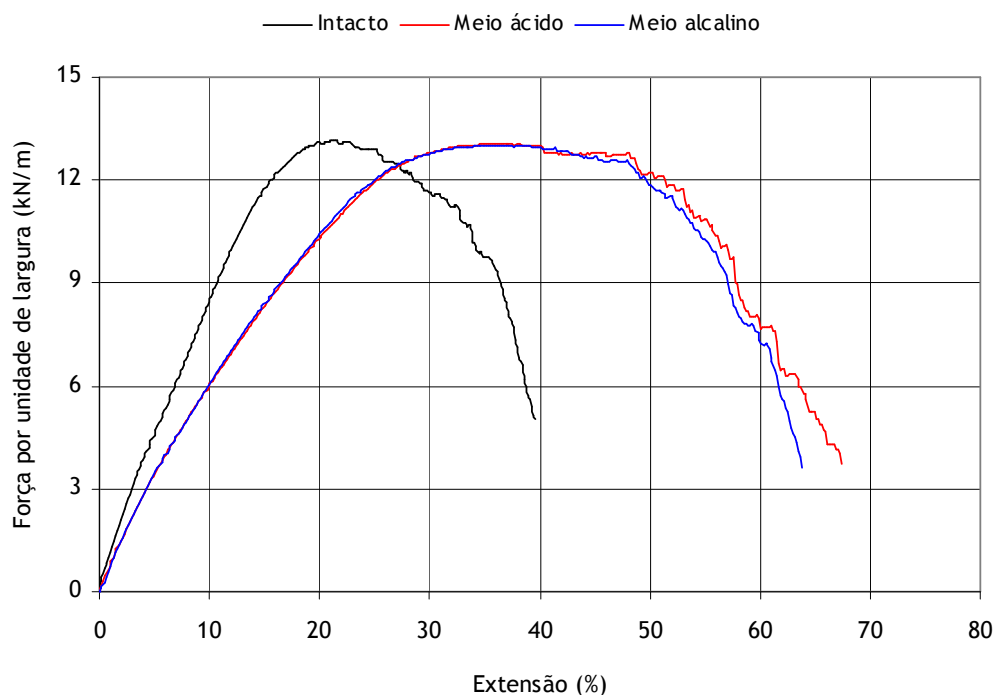


Figura 12.4 - Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

Tal como para a georrede B0, a rigidez secante da georrede B2 também diminuiu após os ensaios de imersão em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio. A robustez da georrede B2 sofreu um grande aumento com as imersões em meio ácido (robustez residual de 169%) e em meio alcalino (robustez residual de 162%). As curvas médias força-extensão das amostras imersas em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio eram muito idênticas entre si (mas significativamente diferentes da curva média força-extensão obtida para as amostras de referência).

As propriedades mecânicas da georrede B2 sofreram algumas alterações após as imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio (a extensão na força máxima e a robustez aumentaram, a rigidez secante diminuiu e a resistência à tracção não sofreu grandes alterações). Assim, e à semelhança da georrede B0, a georrede B2 também apresentou uma boa resistência às imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio.

## 12.6 - Determinação da resistência das georredes à termo-oxidação: método do forno

### 12.6.1 - Descrição experimental

As georredes foram expostas a 100 °C, durante 28 e 56 dias, num forno (marca *Heraeus Instruments*, modelo *T6120*) (as principais características do forno encontram-se descritas no ponto 7.2) com uma atmosfera normal de oxigénio e sem circulação forçada de ar. Os ensaios de termo-oxidação foram realizados de acordo com as orientações da norma NP EN ISO 13438:2006 (Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência à oxidação). De acordo com a norma NP EN ISO 13438, os materiais de PE devem ser expostos a 100 °C durante 28 dias (para todas as aplicações excepto a de reforço) ou durante 56 dias (para aplicações de reforço).

Os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno foram realizados com todas as georredes. Após a exposição, os provetes foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz durante, pelo menos, 24 horas. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 13934-1 (método de ensaio descrito no ponto 12.3).

### 12.6.2 - Georrede B0

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação (método do forno), encontram-se resumidos no Quadro 12.11. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual são apresentados no Quadro 12.12. As curvas médias força-extensão, obtidas antes e depois dos diferentes tempos de exposição à termo-oxidação, estão ilustradas na Figura 12.5.

Quadro 12.11 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 12,7 (2,6%)                                 | 21,4 (5,8%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 13,2 (3,8%)                                 | 45,7 (4,9%)                  | <b>104</b>               |
| 56 Dias | 13,5 (2,5%)                                 | 51,0 (7,6%)                  | <b>106</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.12 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 104                                       | 89,9                                      | 83,0                                       | 291                            | ---                   |
| 28 Dias | 51,8                                      | 52,4                                      | 46,7                                       | 632                            | <b>217</b>            |
| 56 Dias | 64,6                                      | 56,5                                      | 47,6                                       | 712                            | <b>245</b>            |

A resistência à tracção da georrede B0 não sofreu alterações muito significativas após os ensaios de termo-oxidação (resistências residuais próximas dos 100%). A respectiva extensão na força máxima aumentou para mais do dobro no fim dos ensaios de termo-oxidação. De facto, após 28 e 56 dias de exposição, a georrede B0 possuía extensões na força máxima de 45,7% e de 51,0%, respectivamente (extensão original de 21,4%).

A rigidez secante da georrede B0 diminuiu significativamente depois dos ensaios de termo-oxidação a 100 °C (materiais mais deformáveis após os ensaios). Por sua vez, a robustez sofreu um aumento (robustez residual de 217% e de 245% após 28 e 56 dias de exposição, respectivamente).

A georrede B0 (100% PEAD, sem aditivos) apresentou uma alta resistência à oxidação induzida pela temperatura (é importante lembrar que, nas mesmas condições de exposição, os geotêxteis de PP não estabilizados estavam totalmente destruídos após 19 dias de exposição).

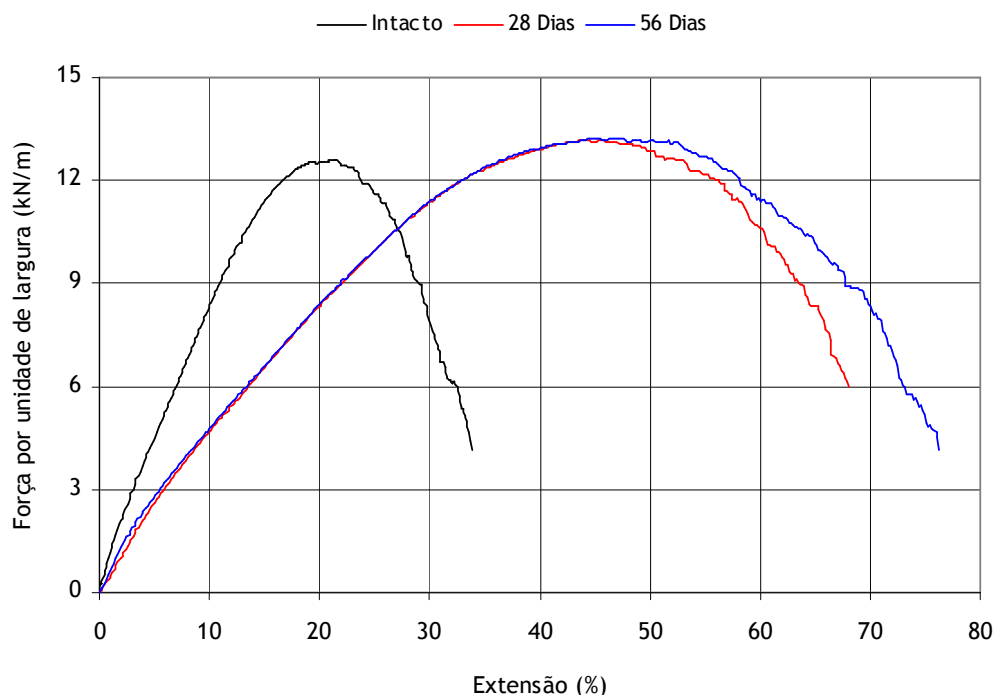


Figura 12.5 - Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

O comportamento da georrede B0 durante os ensaios de termo-oxidação mostrou que os materiais de PEAD não estabilizados possuem maior resistência à oxidação induzida pela temperatura do que os materiais de PP não estabilizados. De facto, a resistência à termo-oxidação dos geotêxteis de PP não estabilizados (B0-280 e B0-500) foi muito menor do que a da georrede de PEAD não estabilizada (B0) (a resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação foi avaliada no Capítulo 7). O aumento do tempo de exposição à termo-oxidação (intervalos de exposição superiores a 56 dias) poderia resultar na degradação completa da georrede B0.

### 12.6.3 - Georrede B2

O Quadro 12.13 resume os valores da resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual são apresentados no Quadro 12.14. As curvas médias força-extensão da georrede B2, obtidas antes e depois da exposição a 100 °C, estão ilustradas na Figura 12.6.

Quadro 12.13 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,3 (2,6%)                                 | 22,6 (7,5%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 15,0 (5,8%)                                 | 53,1 (17%)                   | <b>114</b>               |
| 56 Dias | 14,8 (3,4%)                                 | 53,2 (13%)                   | <b>111</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



Quadro 12.14 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | $J_{SEC}$ 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 104                                   | 91,4                                  | 84,8                                   | 377                               | ---                      |
| 28 Dias | 69,9                                  | 63,4                                  | 54,3                                   | 986                               | <b>262</b>               |
| 56 Dias | 65,2                                  | 61,5                                  | 53,3                                   | 969                               | <b>257</b>               |

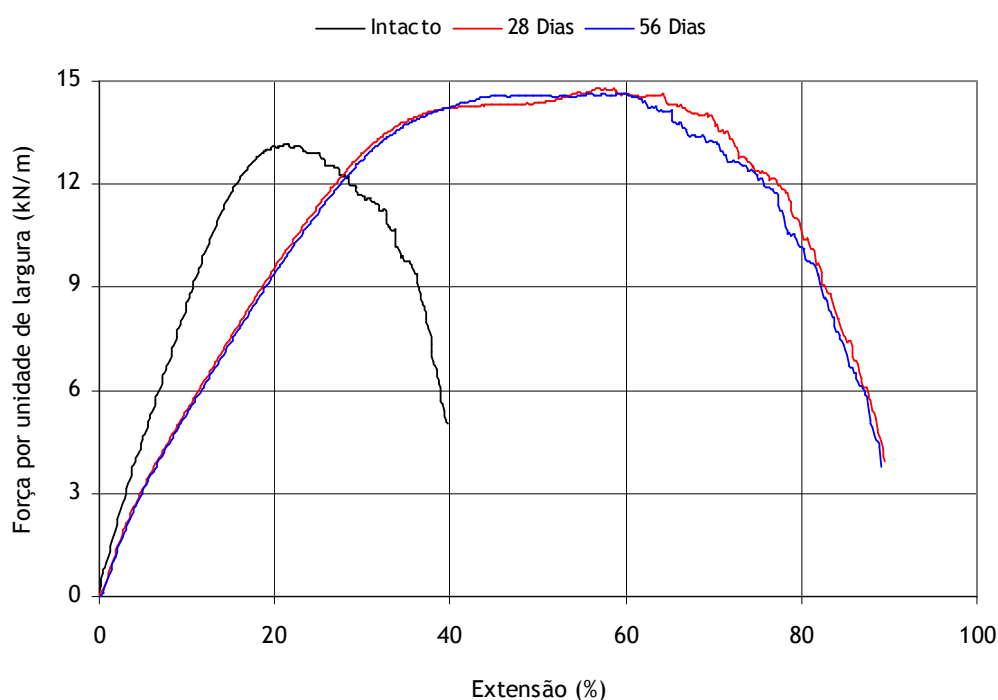


Figura 12.6 - Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

Tal como seria de esperar a partir dos resultados obtidos para a georrede B0, a resistência à tracção da georrede B2 também não diminuiu após os ensaios de termo-oxidação (pelo contrário até ocorreu um ligeiro aumento). A exposição a 100 °C causou um grande aumento da extensão na força máxima da georrede B0 (aumento para mais do dobro).

A rigidez secante da georrede B2 sofreu uma diminuição após a exposição a 100 °C, enquanto que a robustez aumentou significativamente (robustez residual de 262% e de 257% ao fim de 28 e 56 dias de exposição, respectivamente).

De um modo geral, o comportamento da georrede B2 durante os ensaios de termo-oxidação foi igual ao comportamento da georrede B0 (a única diferença entre os dois materiais é a presença, ou não, do aditivo T783). Assim, não foi possível determinar qual o contributo do T783 para o aumento da resistência das georredes de PEAD à termo-oxidação. O efeito do T783 poderia tornar-se evidente através da exposição das georredes a ensaios de termo-oxidação com maior duração (nessa situação, seria de esperar que a degradação da georrede B0 ocorresse primeiro que a degradação da georrede B2).

#### 12.6.4 - Georrede P0

Os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e depois dos vários tempos de exposição à termo-oxidação, são apresentados no Quadro 12.15. O Quadro 12.16 resume os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual. A Figura 12.7 ilustra as curvas médias força-extensão obtidas para a georrede P0, antes e no final dos ensaios de termo-oxidação a 100 °C.

Quadro 12.15 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 12,7 (2,2%)                                  | 22,6 (6,8%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 13,2 (4,0%)                                  | 53,0 (7,3%)                  | <b>104</b>               |
| 56 Dias | 13,4 (6,2%)                                  | 51,2 (9,8%)                  | <b>106</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.16 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 96,7  | 87,7  | 82,3   | 320                             | ---                   |
| 28 Dias | 57,9  | 54,4  | 48,4   | 730                             | <b>228</b>            |
| 56 Dias | 53,4  | 55,2  | 49,1   | 803                             | <b>251</b>            |

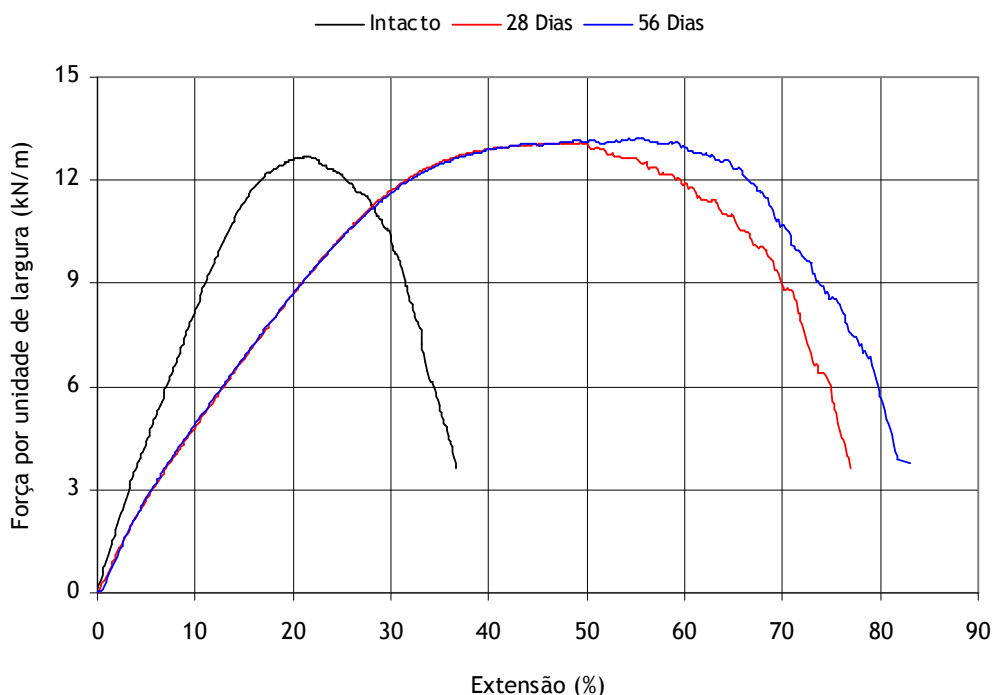


Figura 12.7 - Curvas médias força-extensão da georrede P0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

As alterações ocorridas nas propriedades mecânicas da georrede P0 (após 28 e 56 dias de exposição a 100 °C) foram muito idênticas às alterações observadas nas georredes B0 e B2: ligeiro aumento da resistência à tracção, aumento da extensão na força máxima, aumento da robustez e diminuição da rigidez secante. Dado que, tanto a georrede P0, como a georrede B0 (a única diferença entre os dois materiais é a presença, ou não, de negro de carbono) apresentaram uma resistência muito elevada à termo-oxidação, não foi possível avaliar qual a contribuição do negro de carbono (se alguma) para a resistência das georredes de PEAD à termo-oxidação (a contribuição do negro de carbono poderá ser elucidada através do aumento do tempo de exposição, a 100 °C, das georredes B0 e P0).

### 12.6.5 - Georrede P2

O Quadro 12.17 resume os valores da resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após a exposição à termo-oxidação. Por sua vez, os valores obtidos da rigidez secante, robustez e robustez residual podem ser encontrados no Quadro 12.18. As curvas médias força-extensão da georrede P2, obtidas antes e depois dos diferentes tempos de exposição à termo-oxidação, estão representadas na Figura 12.8.

Quadro 12.17 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,0 (5,7%)                                 | 22,9 (5,9%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 14,5 (2,1%)                                 | 50,6 (4,6%)                  | 112                      |
| 56 Dias | 14,4 (4,1%)                                 | 48,9 (6,2%)                  | 111                      |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.18 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 89,4                                      | 83,8                                      | 79,3                                       | 339                            | ---                   |
| 28 Dias | 54,4                                      | 51,0                                      | 47,2                                       | 671                            | 198                   |
| 56 Dias | 55,8                                      | 52,1                                      | 47,5                                       | 620                            | 183                   |

O comportamento da georrede P2 durante os ensaios de termo-oxidação foi igual ao comportamento das georredes B0, B2 e P2: pequeno aumento da resistência à tracção (resistência residual de 112% aos 28 dias de exposição e resistência residual de 111% ao fim de 56 dias de exposição), aumento da extensão na força máxima (aumento para cerca do dobro), diminuição da rigidez secante (materiais mais deformáveis) e aumento da robustez (robustez residual de 198% após 28 dias de exposição e de 183% depois de 56 dias de exposição). Assim, e à semelhança das georredes B0, B2 e P0, a georrede P2 também apresentou uma boa resistência à oxidação induzida pela temperatura.

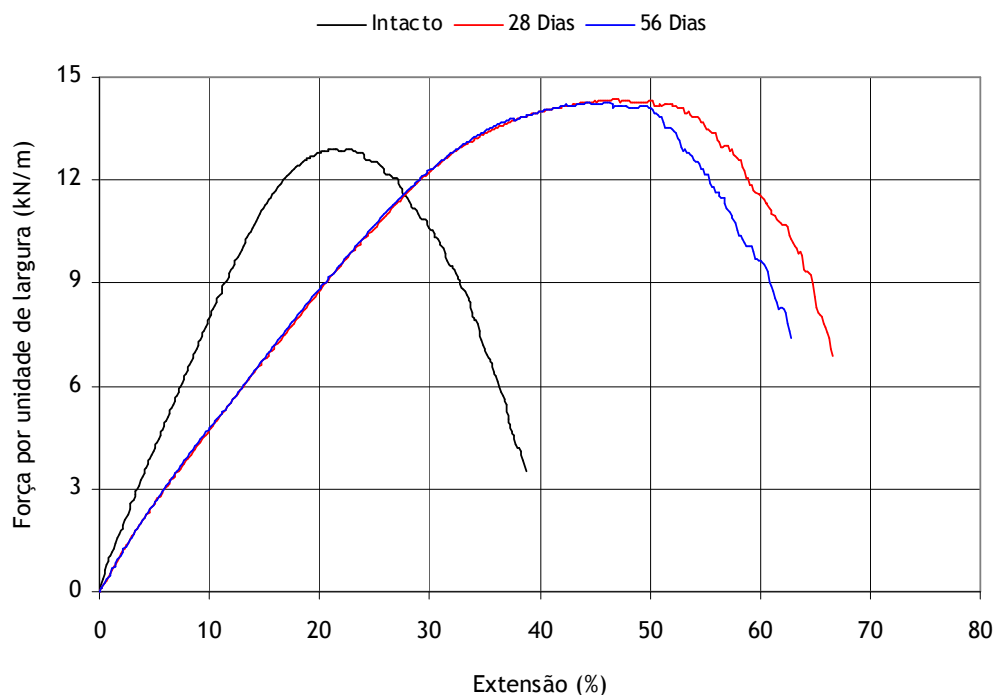


Figura 12.8 - Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

#### 12.6.6 - Georrede V0

O Quadro 12.19 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e depois da exposição à termo-oxidação a 100 °C. Por sua vez, os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual podem ser encontrados no Quadro 12.20. As curvas médias força-extensão da georrede V0, obtidas antes e após os vários tempos de exposição à termo-oxidação, estão ilustradas na Figura 12.9.

Quadro 12.19 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,6 (1,8%)                                 | 23,8 (8,9%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 14,4 (3,3%)                                 | 49,3 (7,0%)                  | <b>106</b>               |
| 56 Dias | 14,6 (3,1%)                                 | 50,2 (3,9%)                  | <b>107</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.20 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 74,0                                      | 74,2                                      | 73,2                                       | 323                            | ---                   |
| 28 Dias | 55,2                                      | 51,6                                      | 47,4                                       | 624                            | <b>193</b>            |
| 56 Dias | 53,8                                      | 51,0                                      | 47,0                                       | 689                            | <b>213</b>            |

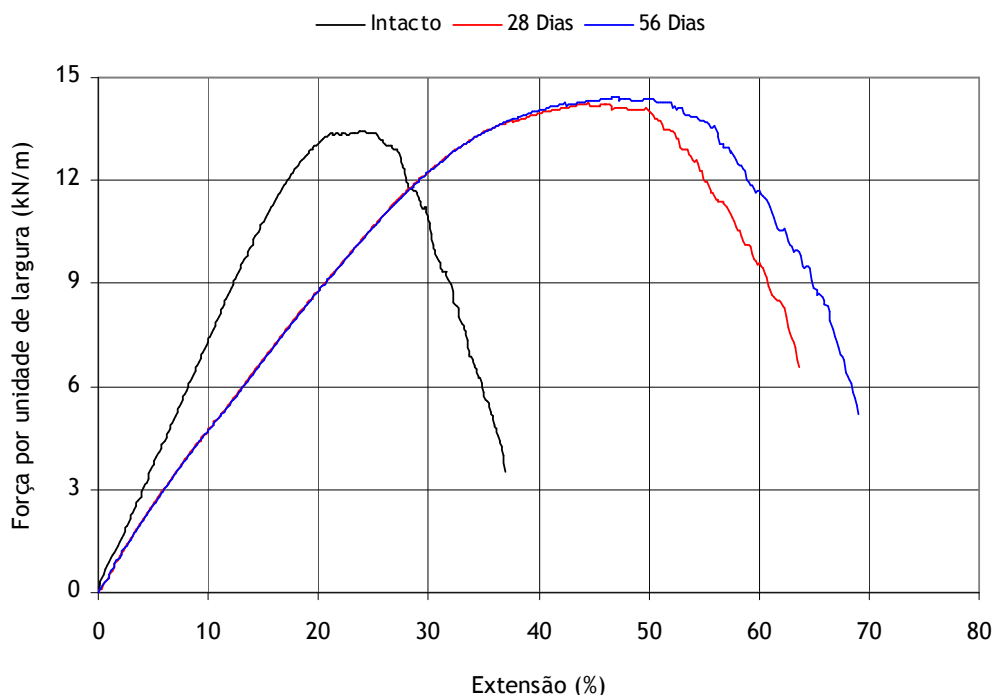


Figura 12.9 - Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo método do forno.

As alterações observadas nas propriedades mecânicas da georrede V0 após 28 e 56 dias de exposição à termo-oxidação foram idênticas às alterações ocorridas nas georredes brancas e pretas. Dado que as georredes V0 e B0 apresentaram ambas uma resistência muito elevada à termo-oxidação (a única diferença entre os dois materiais é a presença, ou não, do pigmento verde), não foi possível avaliar se a incorporação do pigmento verde resulta, ou não, num aumento da resistência das georredes de PEAD à oxidação induzida pela temperatura (o aumento do tempo de exposição das georredes B0 e V0, a 100 °C, poderia esclarecer qual o contributo, se algum, do pigmento verde para a resistência das georredes de PEAD à termo-oxidação).

## 12.7 - Determinação da resistência das georredes à termo-oxidação: novo método

### 12.7.1 - Descrição experimental

A resistência das georredes de PEAD à termo-oxidação foi também avaliada através do novo método de ensaio desenvolvido neste trabalho. As características do equipamento protótipo desenvolvido e do novo método de exposição de geossintéticos à termo-oxidação encontram-se no Capítulo 8.

As georredes B0 e B2 foram imersas em 4 L de peróxido de hidrogénio (15 volumes), à temperatura de 80 °C, durante 28 dias (a pressão no interior do autoclave atingiu cerca de 35-40 bar; a evolução da pressão no interior do autoclave encontra-se na Figura 8.14 - ensaios A e B). Não foi possível, em tempo útil, realizar ensaios de termo-oxidação através do novo método para as georredes P0, P2 e V0. De um modo geral, os procedimentos usados para expor as georredes de PEAD à termo-oxidação através do novo método foram iguais aos usados para a exposição dos geotêxteis de PP (Capítulo 8).

Após os ensaios de termo-oxidação, os provetes das georredes foram lavados (com água desionizada) e foram secos em local escuro (tempo de secagem mínimo de 7 dias). Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 13934-1 (ponto 12.3).

### 12.7.2 - Principais resultados obtidos

A cor das georredes B0 e B2 (originalmente branca) não sofreu qualquer alteração durante os 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio. A cor da solução de imersão (originalmente incolor) também não sofreu alteração. As georredes não possuíam danos visíveis e não foram notados odores a “plástico queimado” provenientes da solução de imersão ou dos próprios materiais.

As propriedades mecânicas da georrede B0, obtidas antes e após os 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio, encontram-se nos Quadros 12.21 e 12.22. Do mesmo modo, as propriedades mecânicas da georrede B2 estão resumidas nos Quadros 12.23 e 12.24. As respectivas curvas médias força-extensão estão representadas na Figura 12.10.

Quadro 12.21 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 12,7 (2,6%)                                 | 21,4 (5,8%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 7,77 (19%)                                  | 15,5 (39%)                   | <b>61,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.22 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 104                                       | 89,9                                      | 83,0                                       | 291                            | ---                   |
| 28 Dias | 99,1                                      | 80,2                                      | 57,9                                       | 156                            | <b>53,6</b>           |

Quadro 12.23 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

| Tempo   | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|---------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto | 13,3 (2,6%)                                 | 22,6 (7,5%)                  | ---                      |
| 28 Dias | 16,0 (8,4%)                                 | 30,2 (14%)                   | <b>120</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.24 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

| Tempo   | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|---------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto | 104                                       | 91,4                                      | 84,8                                       | 377                            | ---                   |
| 28 Dias | 110,9                                     | 90,2                                      | 78,8                                       | 541                            | <b>144</b>            |

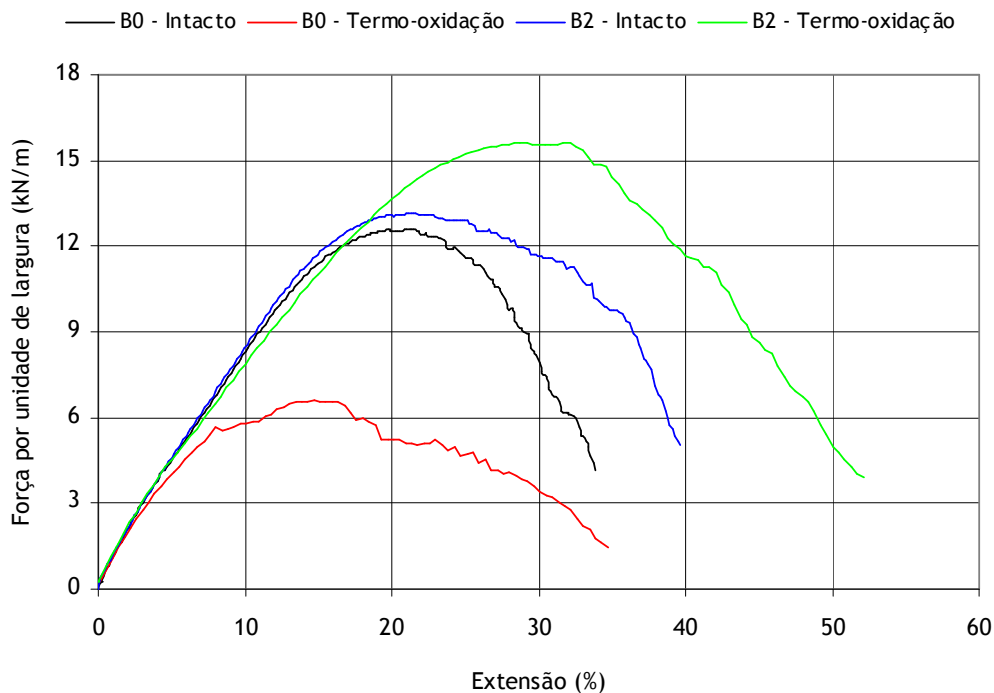


Figura 12.10 - Curvas médias força-extensão das georredes B0 e B2, antes e após os ensaios de termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

A resistência à tracção da georrede B0 sofreu uma grande diminuição após os 28 dias de exposição à termo-oxidação no autoclave (resistência residual de 61,2%). A respectiva extensão na força máxima também sofreu uma diminuição (redução dos 21,4% para os 15,5%). Aos 28 dias de termo-oxidação, a georrede B0 possuía uma robustez residual de 53,6%. A rigidez secante da georrede B0, à extensão de 10%, sofreu uma redução ao fim de 28 dias de termo-oxidação.

Ao contrário da georrede B0, a exposição à termo-oxidação (pelo novo método) não provocou uma diminuição da resistência à tracção da georrede B2 (resistência residual de 120% ao fim de 28 dias de exposição). A extensão na força máxima e a robustez também aumentaram depois dos ensaios de termo-oxidação. A rigidez secante da georrede B2 não sofreu grandes alterações após os 28 dias de termo-oxidação no autoclave.

A degradação ocorrida na georrede B0 durante o ensaio de termo-oxidação no autoclave foi superior à degradação observada na georrede B2, o que mostrou a importância do aditivo T783 na protecção das georredes de PEAD contra a degradação provocada por este agente. Deste modo, a presença de T783 nas georredes de PEAD resultou num aumento muito significativo da resistência dos materiais à termo-oxidação.

O novo método permitiu distinguir, em termos de resistência à termo-oxidação, duas georredes de PEAD com diferentes estabilizações químicas (é importante lembrar que através do método do forno não foi possível distinguir, em termos de resistência à termo-oxidação, e num intervalo de tempo suficientemente curto, a georrede B0 da georrede B2).

Os resultados obtidos para as georredes B0 e B2 mostram, mais uma vez, que o novo método é uma boa alternativa para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. O método é bastante simples, barato, relativamente rápido e de fácil execução experimental. Além disso, permitiu, mais uma vez, distinguir materiais (em termos de resistência à oxidação induzida pela temperatura) que não foram distinguidos pelo método do forno.

O comportamento da georrede B0 indicou, mais uma vez, que os materiais de PP não estabilizados possuem menor resistência à termo-oxidação que os materiais de PEAD não estabilizados. De facto, nas mesmas condições experimentais, o geotêxtil B0-500 (100% PP) estava completamente destruído após 14 dias de exposição (ao fim de 7 dias de exposição, possuía uma resistência residual de 31,1%) (a resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação foi avaliada, pelo novo método de ensaio, no Capítulo 8).

Dada a ocorrência de danificação na georrede B0 (100% PEAD) durante a exposição no autoclave, o novo método de ensaio poderá permitir avaliar qual a contribuição (se alguma) do negro de carbono e do pigmento verde para a resistência das georredes de PEAD à termo-oxidação. No entanto, e tal como foi referido anteriormente, não foi possível expor as georredes P0, P2 e V0 à termo-oxidação pelo novo método de ensaio.

## **12.8 - Determinação da resistência das georredes aos agentes climatéricos artificiais**

### **12.8.1 - Descrição experimental**

As georredes foram expostas aos agentes climatéricos artificiais (radiação UV, chuva e orvalho e/ou humidade) num simulador laboratorial - o QUV (marca *Q-Panel Lab Products*, modelo *QUV/spray*) (a descrição detalhada do QUV encontra-se no ponto 9.2). As georredes foram expostas ao mesmo ciclo climatérico (Quadro 12.25) (designado por ciclo C62 no ponto 9.3.1) durante diferentes períodos de tempo (250, 500, 1000, 2000 e 4000 horas). Os ensaios climatéricos (com diferentes durações) foram realizados para todas as georredes.

Quadro 12.25 - Ciclo climatérico a que as georredes foram expostas no QUV.

|   |
|---|
| Passo 1: Exposição à radiação UV (60 °C) (6 horas)                    |
| Passo 2: Chuva (choque térmico) (10 minutos) (5 L.min <sup>-1</sup> ) |
| Passo 3: Condensação (45 °C) (2 horas)                                |
| (retorno ao passo 1)  |

A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de 0,68 W.m<sup>-2</sup> aos 340 nm. A radiação incidente total a que as georredes foram expostas aumentou com o aumento da duração do ensaio climatérico. O Quadro 12.26 resume, para as diferentes durações dos ensaios, os valores da radiação incidente total e o número de ciclos climatéricos a que as georredes foram expostas.



Quadro 12.26 - Número de ciclos climáticos e radiação incidente total para os diferentes tempos de exposição das georredes aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Número de ciclos climáticos | Radiação incidente total (340 nm) | Radiação incidente total (290-400 nm) |
|------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 250 Horas  | 30,6                        | 0,45 MJ.m <sup>-2</sup>           | 25,92 MJ.m <sup>-2</sup>              |
| 500 Horas  | 61,2                        | 0,90 MJ.m <sup>-2</sup>           | 51,84 MJ.m <sup>-2</sup>              |
| 1000 Horas | 122,4                       | 1,80 MJ.m <sup>-2</sup>           | 103,68 MJ.m <sup>-2</sup>             |
| 2000 Horas | 244,9                       | 3,60 MJ.m <sup>-2</sup>           | 207,36 MJ.m <sup>-2</sup>             |
| 4000 Horas | 489,8                       | 7,20 MJ.m <sup>-2</sup>           | 414,72 MJ.m <sup>-2</sup>             |

Após os ensaios climáticos no QUV, os provetes das georredes foram armazenados em local seco e escuro por um período mínimo de 7 dias. Em seguida, foram sujeitos a ensaios de tracção-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 13934-1 (método de ensaio descrito no ponto 12.3).

### 12.8.2 - Georrede B0

A georrede B0 não possuía sinais visíveis de degradação após 250, 500 e 1000 horas de exposição aos agentes climáticos. No entanto, ao fim de 2000 horas de exposição, estava muito danificada: os provetes estavam quebrados e eram facilmente transformados em pequenos pedaços (Figura 12.11). A cor da georrede B0 não sofreu nenhuma alteração durante os ensaios climáticos no QUV.

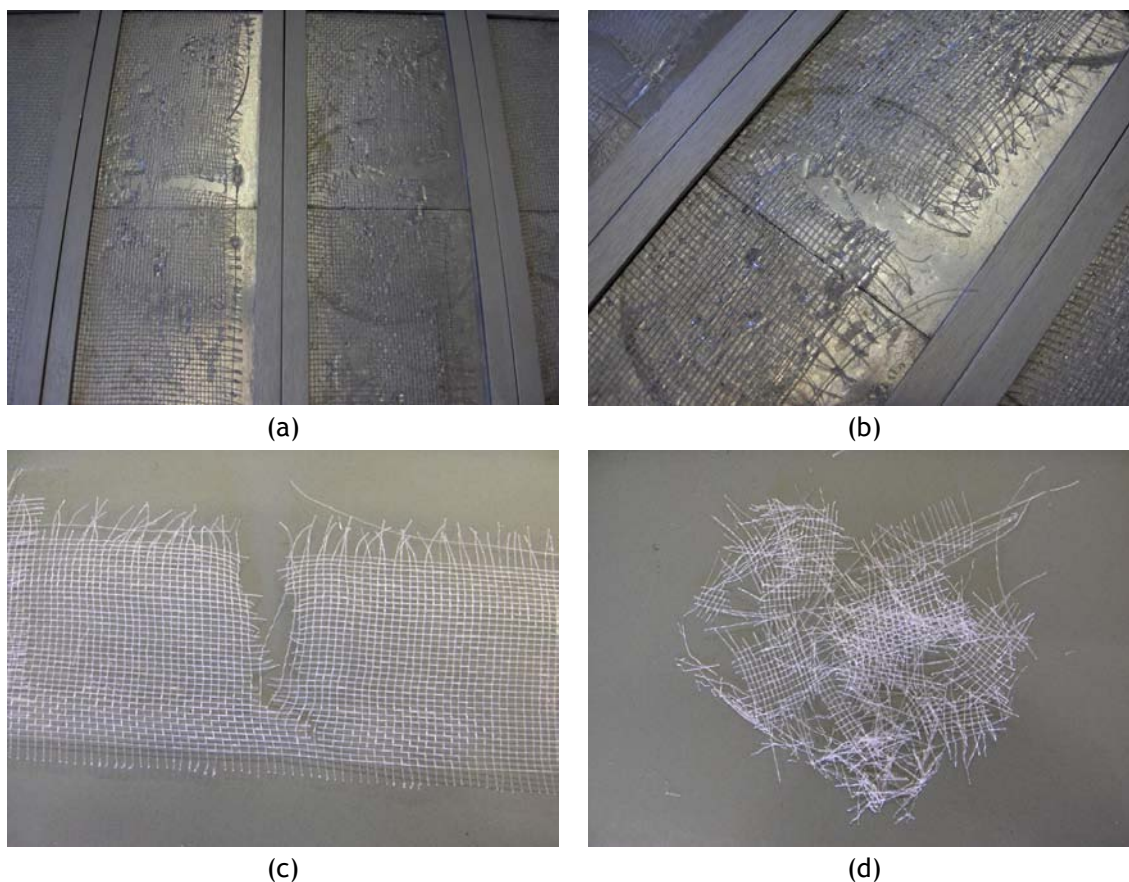


Figura 12.11 - Aspecto da georrede B0 após 2000 horas de exposição no QUV: (a), (b) e (c) aspecto dos provetes; (d) provete transformado em pequenos pedaços.

As propriedades mecânicas da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV, encontram-se resumidas nos Quadros 12.27 e 12.28. As curvas médias força-extensão obtidas para a georrede B0, antes e depois dos ensaios climáticos no QUV, estão ilustradas na Figura 12.12.

Quadro 12.27 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 12,7 (2,6%)                                  | 21,4 (5,8%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 12,6 (2,0%)                                  | 21,8 (9,8%)                  | <b>99,2</b>              |
| 500 Horas  | 11,4 (4,9%)                                  | 21,5 (7,2%)                  | <b>89,8</b>              |
| 1000 Horas | 5,05 (12%)                                   | 4,1 (14%)                    | <b>39,8</b>              |
| 2000 Horas | 0  | ---                          | <b>0</b>                 |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.28 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 104   | 89,9  | 83,0   | 291                             | ---                   |
| 250 Horas  | 120   | 94,3  | 82,1   | 273                             | <b>93,8</b>           |
| 500 Horas  | 116   | 91,0  | 77,0   | 300                             | <b>103</b>            |
| 1000 Horas | 170   | 54,1  | ---  | 16,1                            | <b>5,5</b>            |
| 2000 Horas | ---   | ---   | ---  | 0                               | <b>0</b>              |

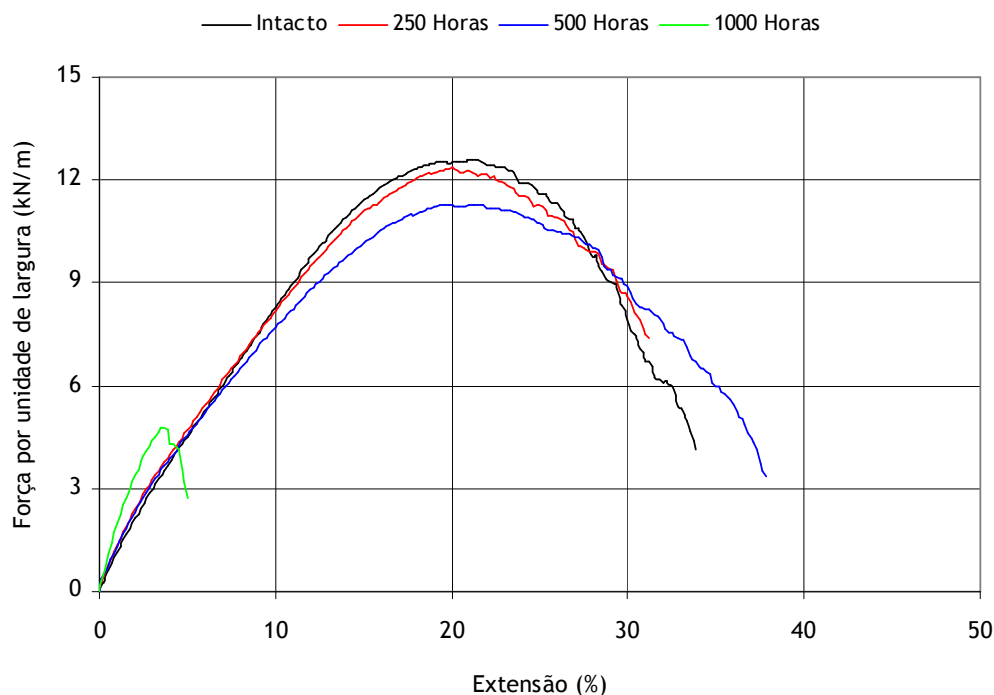


Figura 12.12 - Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

A resistência à tracção da georrede B0 não sofreu alterações significativas ao fim das primeiras 250 horas de exposição aos agentes climáticos (resistência residual de 99,2%). O aumento do tempo de exposição (aumento da radiação incidente total) provocou uma diminuição gradual da resistência à tracção. De facto, após 500 e 1000 horas de exposição, a georrede B0 possuía resistências residuais de 89,8% e de 39,8%, respectivamente. Ao fim de 2000 horas de exposição, a resistência à tracção da georrede B0 era nula.

A extensão na força máxima da georrede B0 manteve-se praticamente inalterada após as exposições de 250 e de 500 horas aos agentes climáticos no QUV (extensões na força máxima muito idênticas à original). Depois de 1000 horas de exposição, o valor deste parâmetro (4,1%) era bastante inferior ao original (21,4%).

De um modo geral, a rigidez secante da georrede B0 não sofreu grandes alterações após 250 e 500 horas de exposição no QUV. Às 1000 horas de exposição, a georrede B0 possuía, a 2% de extensão, uma rigidez secante maior que a original (aumento de 104 para 170 kN.m<sup>-1</sup>); a 5% de extensão, a rigidez secante dos provetes expostos (durante 1000 horas) era inferior ao valor de referência.

A robustez da georrede B0 não sofreu alterações significativas após 250 e 500 horas de exposição no QUV (robustez residual de 93,8% e de 103%, respectivamente). O aumento do tempo de exposição de 500 para 1000 horas provocou uma grande diminuição da robustez do material. De facto, depois de 1000 horas de exposição, a georrede B0 possuía uma robustez residual de apenas 5.5% (robustez nula ao fim de 2000 horas de exposição).

Em comparação com os geotêxteis de PP não estabilizados (Capítulo 9), a georrede B0 (100% PEAD, não estabilizada) apresentou uma boa resistência aos agentes climáticos simulados em laboratório (é importante lembrar que, após 250 horas de exposição no QUV - 0,30 MJ.m<sup>-2</sup> de radiação incidente total a 340 nm - os geotêxteis de PP não estabilizados estavam quase totalmente destruídos). Deste modo, os materiais de PEAD não estabilizados possuem maior resistência à foto-degradação do que os materiais de PP não estabilizados.

### 12.8.3 - Georrede B2

A georrede B2 não apresentava sinais visíveis de degradação após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV, o que, desde logo, mostrou a importância do T783 na protecção das georredes de PEAD contra a acção dos agentes climáticos (na ausência do aditivo, os materiais estariam totalmente destruídos ao fim de 2000 horas de exposição).

O Quadro 12.29 resume os valores obtidos da resistência à tracção, da extensão na força máxima e da resistência residual da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual são apresentados no Quadro 12.30. As curvas médias força-extensão obtidas para a georrede B2, antes e depois da exposição aos agentes climáticos, estão representadas na Figura 12.13.

Quadro 12.29 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 13,3 (2,6%)                                  | 22,6 (7,5%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 13,8 (1,1%)                                  | 22,7 (5,8%)                  | <b>104</b>               |
| 500 Horas  | 13,5 (2,2%)                                  | 23,8 (5,9%)                  | <b>102</b>               |
| 1000 Horas | 13,7 (1,4%)                                  | 24,0 (6,5%)                  | <b>103</b>               |
| 2000 Horas | 11,8 (1,7%)                                  | 23,4 (1,7%)                  | <b>88,7</b>              |
| 4000 Horas | 12,0 (2,4%)                                  | 24,7 (6,8%)                  | <b>90,2</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.30 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 104   | 91,4  | 84,8   | 377                             | ---                   |
| 250 Horas  | 130   | 104   | 90,4   | 404                             | <b>107</b>            |
| 500 Horas  | 118   | 98,8  | 86,5   | 442                             | <b>117</b>            |
| 1000 Horas | 117   | 98,9  | 86,8   | 436                             | <b>116</b>            |
| 2000 Horas | 114   | 93,7  | 78,6   | 481                             | <b>128</b>            |
| 4000 Horas | 109   | 92,6  | 78,0   | 534                             | <b>142</b>            |

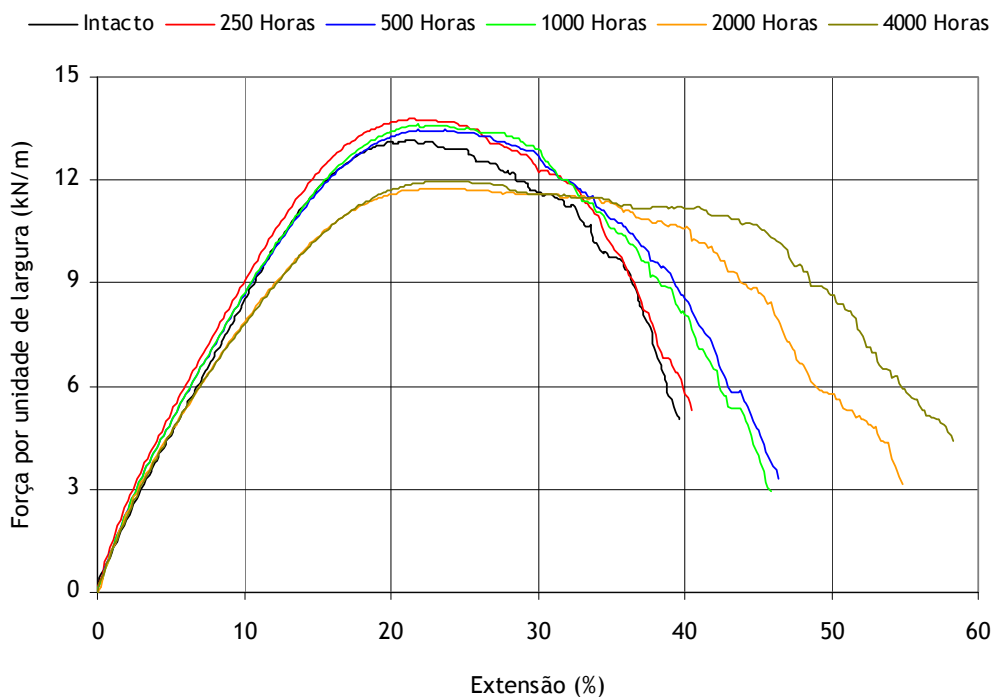


Figura 12.13 - Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

A resistência à tracção da georrede B2 não sofreu grandes alterações após 250, 500 e 1000 horas de exposição aos agentes climáticos no QUV. Ao fim de 2000 e 4000 horas de exposição, ocorreu uma pequena diminuição da resistência à tracção do material (resistências residuais de 88,7% e de 90,2%, respectivamente). A respectiva extensão na força máxima não sofreu alterações muito significativas após a exposição aos agentes climáticos (apenas um ligeiro aumento).

De um modo geral, a rigidez secante da georrede B2 também não sofreu grandes variações ao longo da exposição aos agentes climáticos. Por sua vez, a robustez aumentou após os diferentes tempos de exposição no QUV (ao fim de 4000 horas de exposição, robustez residual de 142%).

A degradação sofrida pelas georredes de PEAD durante a exposição aos agentes climáticos no QUV foi bastante retardada pela incorporação de uma pequena quantidade (0,22%) do aditivo T783. De facto, ao fim de 4000 horas de exposição no QUV, a georrede B2 ainda não possuía grandes sinais de degradação (é importante notar que a georrede B0 estava completamente destruída depois de 2000 horas de exposição); após 1000 horas de exposição, a georrede B0 apresentava mais danos do que a georrede B2 ao fim de 4000 horas de exposição.

#### 12.8.4 - Georrede P0

Ao contrário da georrede B0 (e tal como a georrede B2), a georrede P0 não possuía sinais visíveis de degradação após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV. Dado que a única diferença existente entre a georrede P0 e a georrede B0 é a presença, ou não, do negro de carbono, o facto de não ter ocorrido a destruição completa da georrede P0 indicou, desde logo, a existência de um contributo do pigmento para o aumento da resistência das georredes de PEAD aos agentes climáticos (na ausência do negro de carbono, os materiais estariam destruídos após 2000 horas de exposição no QUV).

As propriedades mecânicas da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição no QUV, encontram-se resumidas nos Quadros 12.31 e 12.32. As curvas médias força-extensão obtidas para a georrede B0, antes e depois dos ensaios climáticos no QUV, estão ilustradas na Figura 12.14.

Quadro 12.31 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 12,7 (2,2%)                                 | 22,6 (6,8%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 13,2 (3,7%)                                 | 23,2 (8,6%)                  | <b>104</b>               |
| 500 Horas  | 12,8 (2,4%)                                 | 22,5 (6,0%)                  | <b>101</b>               |
| 1000 Horas | 13,0 (1,6%)                                 | 22,7 (2,3%)                  | <b>102</b>               |
| 2000 Horas | 11,6 (3,3%)                                 | 23,7 (7,6%)                  | <b>91,3</b>              |
| 4000 Horas | 11,5 (3,1%)                                 | 23,4 (1,2%)                  | <b>90,6</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.32 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|------------|--|--|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 96,7   | 87,7   | 82,3  | 320                               | ---                      |
| 250 Horas  | 122  | 98,7   | 86,1  | 340                               | <b>106</b>               |
| 500 Horas  | 122  | 98,6   | 85,2  | 368                               | <b>115</b>               |
| 1000 Horas | 125  | 101  | 87,0  | 360                               | <b>112</b>               |
| 2000 Horas | 108  | 91,0   | 77,3  | 384                               | <b>120</b>               |
| 4000 Horas | 107  | 91,2   | 77,0  | 368                               | <b>115</b>               |

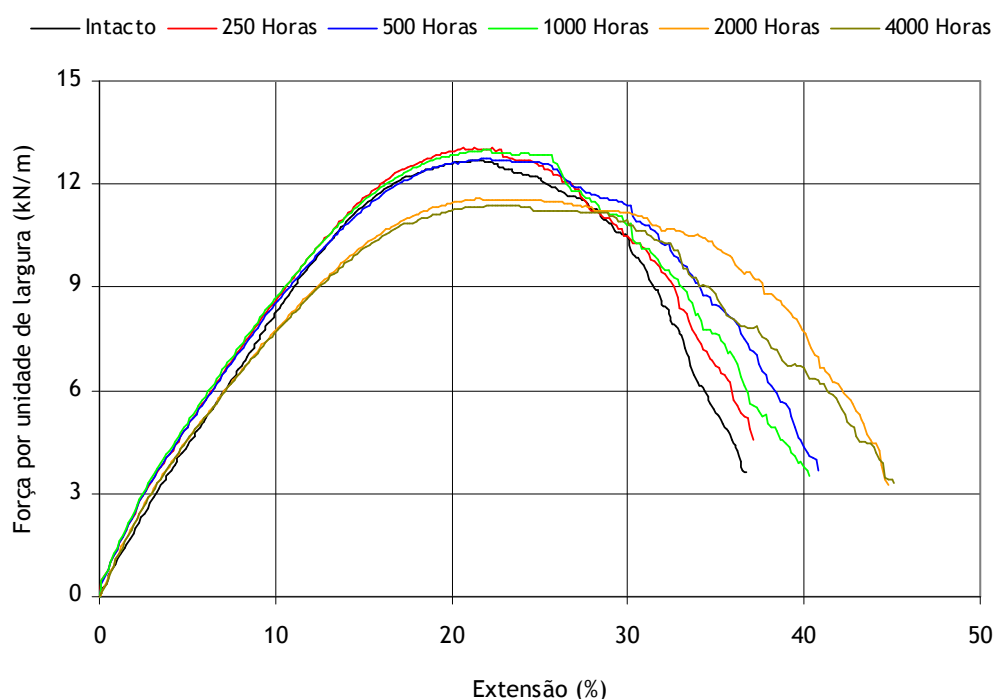


Figura 12.14 - Curvas médias força-estensão da georrede P0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

A resistência à tracção da georrede P0 não sofreu uma grande diminuição depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos simulados no QUV. De facto, após 4000 horas de exposição, o material ainda apresentava uma resistência residual muito elevada (90,6%). Não foram encontradas alterações significativas na extensão na força máxima da georrede P0 provocadas pela exposição aos agentes em causa. A robustez aumentou depois dos diferentes tempos de exposição no QUV (ao fim de 4000 horas de exposição, robustez residual de 115%).

A presença de negro de carbono retardou significativamente a degradação sofrida pelas georredes de PEAD durante a exposição aos agentes climáticos simulados no QUV. De facto, os danos sofridos pela georrede B0 após 1000 horas de exposição (resistência residual de 39,8%, robustez residual de 5,5%) foram muito maiores que danos ocorridos na georrede P0 ao fim de 4000 horas de exposição.

### 12.8.5 - Georrede P2

Tal como a georrede P0, a georrede P2 também não apresentava danos visíveis após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV. As propriedades mecânicas da georrede P0, obtidas antes e após a exposição aos agentes climáticos, encontram-se resumidas no Quadro 12.33 e no Quadro 12.34. As respectivas curvas médias força-extensão estão ilustradas na Figura 12.15.

Quadro 12.33 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 13,0 (5,7%)                                 | 22,9 (5,9%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 13,2 (0,8%)                                 | 22,9 (6,3%)                  | <b>102</b>               |
| 500 Horas  | 13,4 (1,8%)                                 | 23,5 (4,3%)                  | <b>103</b>               |
| 1000 Horas | 13,5 (1,1%)                                 | 24,9 (4,3%)                  | <b>104</b>               |
| 2000 Horas | 12,1 (4,9%)                                 | 22,9 (3,8%)                  | <b>93,1</b>              |
| 4000 Horas | 12,3 (7,4%)                                 | 26,0 (3,4%)                  | <b>94,6</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.34 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|------------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto    | 89,4                                      | 83,8                                      | 79,3                                       | 339                            | ---                   |
| 250 Horas  | 121                                       | 97,9                                      | 85,4                                       | 350                            | <b>103</b>            |
| 500 Horas  | 115                                       | 97,2                                      | 85,8                                       | 440                            | <b>130</b>            |
| 1000 Horas | 96,0                                      | 86,1                                      | 78,7                                       | 341                            | <b>101</b>            |
| 2000 Horas | 116                                       | 95,5                                      | 80,7                                       | 435                            | <b>128</b>            |
| 4000 Horas | 89,9                                      | 82,5                                      | 73,8                                       | 364                            | <b>107</b>            |

Tal como seria de esperar a partir dos resultados obtidos para a georrede P0, a resistência à tracção da georrede P2 não sofreu alterações muito significativas durante a exposição no QUV. De facto, ao fim de 4000 horas de exposição, o material ainda possuía uma resistência à tracção muito elevada (94,6%). A exposição no QUV também não provocou grandes variações na extensão na força máxima (variação máxima de 22,9% para 26,0%). A robustez da georrede P2 aumentou devido à exposição no QUV (após 4000 horas de exposição, robustez residual de 107%).

A resistência da georrede P2 aos agentes climáticos simulados no QUV foi idêntica à resistência da georrede P0. O aumento do tempo de exposição poderia permitir distinguir os dois materiais em termos da resistência aos agentes em análise; nessa situação, é expectável que a degradação total da georrede P0 (sem T783) ocorra mais rapidamente do que a degradação total da georrede P2 (com T783).

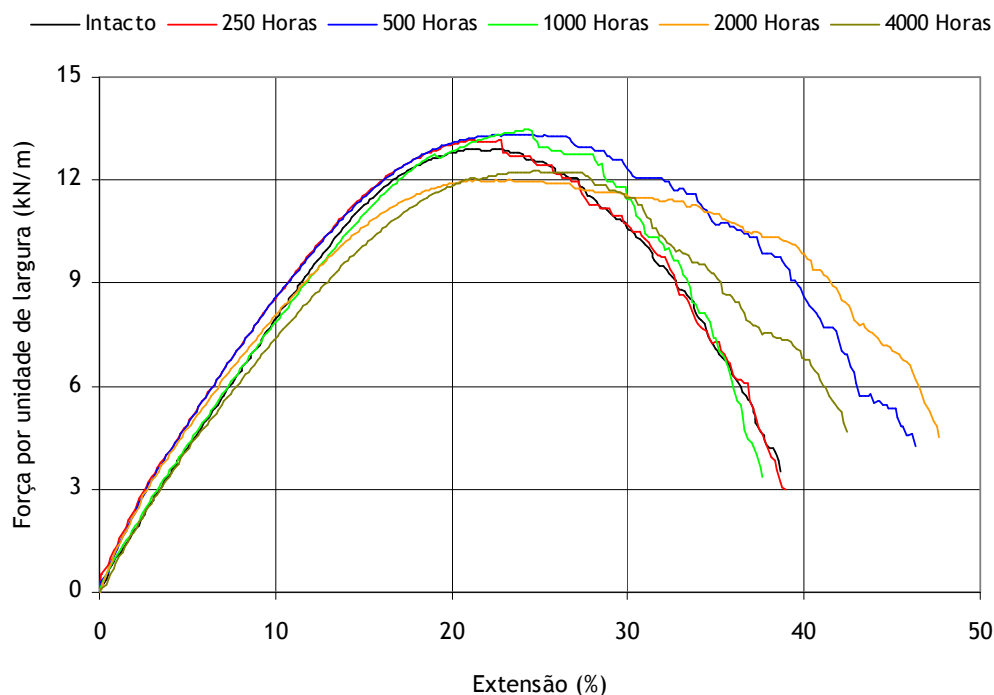


Figura 12.15 - Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

#### 12.8.6 - Georrede V0

Ao contrário da georrede B0, a georrede V0 não apresentava danos visíveis após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos, o que mostrou imediatamente a existência de um contributo do pigmento verde para o aumento da resistência das georredes de PEAD aos agentes em causa (a única diferença entre as georredes V0 e B0 é a presença, ou não, do pigmento verde).

O Quadro 12.35 resume os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e depois dos ensaios climáticos no QUV. Os valores da rigidez secante, da robustez e da robustez residual encontram-se no Quadro 12.36. As curvas médias força-extensão da georrede V0, obtidas antes e após os vários tempos de exposição no QUV, estão representadas na Figura 12.16.

Quadro 12.35 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 13,6 (1,8%)                                  | 23,8 (8,9%)                  | ---                      |
| 250 Horas  | 14,0 (3,0%)                                  | 26,0 (4,6%)                  | <b>103</b>               |
| 500 Horas  | 13,6 (1,6%)                                  | 25,7 (6,0%)                  | <b>100</b>               |
| 1000 Horas | 13,5 (1,6%)                                  | 25,4 (3,4%)                  | <b>99,3</b>              |
| 2000 Horas | 11,1 (2,9%)                                  | 23,8 (6,9%)                  | <b>81,6</b>              |
| 4000 Horas | 9,76 (6,2%)                                  | 19,9 (10%)                   | <b>71,8</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)



Quadro 12.36 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

| Tempo      | $J_{SEC}$ 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC}$ 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto    | 74,0                                  | 74,2                                  | 73,2                                   | 323                               | ---                      |
| 250 Horas  | 87,1                                  | 81,4                                  | 76,5                                   | 332                               | <b>103</b>               |
| 500 Horas  | 90,5                                  | 83,1                                  | 77,1                                   | 357                               | <b>111</b>               |
| 1000 Horas | 85,7                                  | 80,6                                  | 75,7                                   | 331                               | <b>102</b>               |
| 2000 Horas | 73,0                                  | 72,5                                  | 66,5                                   | 291                               | <b>90,1</b>              |
| 4000 Horas | 87,0                                  | 78,6                                  | 67,5                                   | 142                               | <b>44,0</b>              |

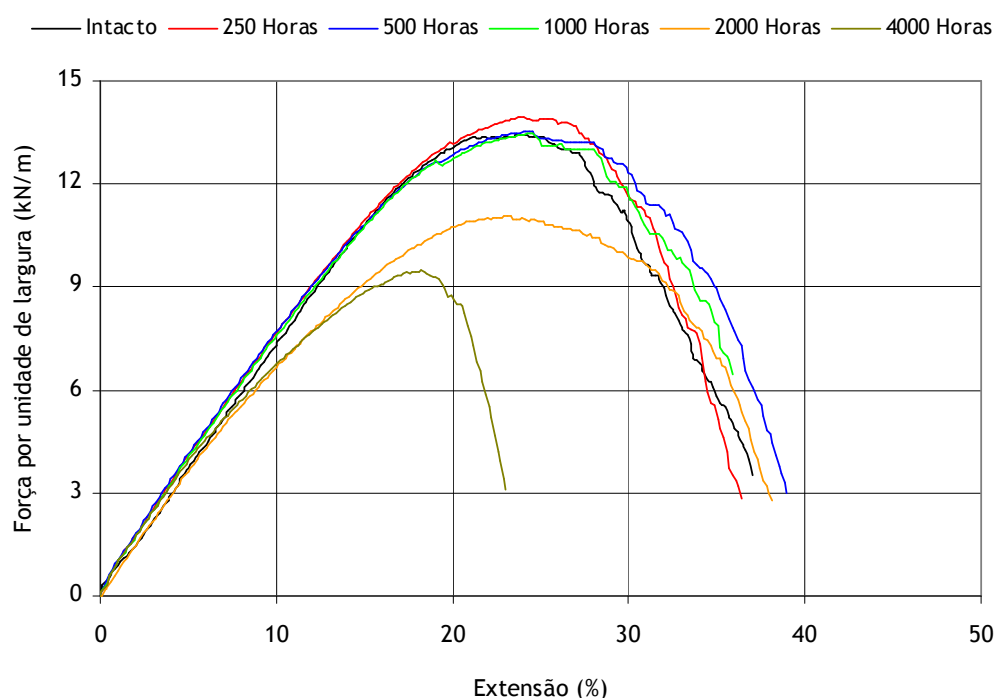


Figura 12.16 - Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos no QUV.

A resistência à tracção da georrede V0 não sofreu alterações significativas depois de 250, 500 e 1000 horas de exposição no QUV (resistências residuais de 103%, de 100% e de 99,3%, respectivamente). No entanto, após 2000 horas de exposição, a resistência à tracção do material era inferior à original (resistência residual de 81,6%). Ao fim de 4000 horas de exposição, a georrede V0 apresentava uma resistência residual de 71,8%.

A exposição no QUV causou algumas alterações na extensão na força máxima da georrede V0 (ligeiro aumento após 250, 500 e 1000 horas e pequena diminuição ao fim de 4000 horas). A rigidez secante do material sofreu apenas pequenas variações (de um modo geral, sem grande significado). Por fim, não ocorreram alterações importantes na robustez da georrede V0 durante as primeiras 1000 horas de exposição no QUV. No entanto, no fim de 2000 e de 4000 horas de exposição, o material possuía uma robustez residual de 90,1% e de 44,0%, respectivamente.

A degradação ocorrida nas georredes de PEAD durante a exposição aos agentes climáticos no QUV foi retardada pela incorporação do pigmento verde nos materiais. De facto, os danos encontrados na georrede V0 após 4000 horas de exposição eram menores que os danos ocorridos na georrede B0 ao fim de 1000 horas de exposição (resistência residual de 39,8%, robustez residual de 5,5%). Assim, a incorporação de pigmentos (como o negro de carbono ou o pigmento verde) nas georredes de PEAD podem aumentar a resistência dos materiais contra a acção dos agentes climáticos.

A degradação observada na georrede P0 (com negro de carbono) foi inferior à degradação ocorrida na georrede V0 (com o pigmento verde). De facto, após 4000 horas de exposição no QUV, a georrede P0 possuía uma resistência residual de 90,6% e uma robustez residual de 115% (resistência residual de 71,8% e robustez residual de 44,0% para a georrede V0). Deste modo, a incorporação de negro de carbono (1,05%) nas georredes de PEAD resultou numa maior protecção dos materiais contra a acção dos agentes climáticos simulados no QUV do que a incorporação do pigmento verde (1,10%).

## 12.9 - Determinação da resistência das georredes aos agentes climáticos reais

### 12.9.1 - Descrição experimental

O local de exposição das georredes aos agentes climáticos reais (latitude de 41°13'N, longitude de 8°39'W, elevação de 49 metros acima do nível do mar) foi o mesmo dos geotêxteis (Capítulo 10). As georredes foram colocadas em suportes metálicos (suportes do tipo II) orientados para Sul com uma inclinação de 30° (os provetes foram fixados nos suportes através de placas metálicas) (a descrição das principais características dos suportes metálicos e do modo de fixação dos provetes encontra-se no ponto 10.2). A Figura 12.17 ilustra as georredes expostas aos agentes climáticos reais.



(a)

(a Figura 12.17 continua na página seguinte)

(continuação da Figura 12.17)

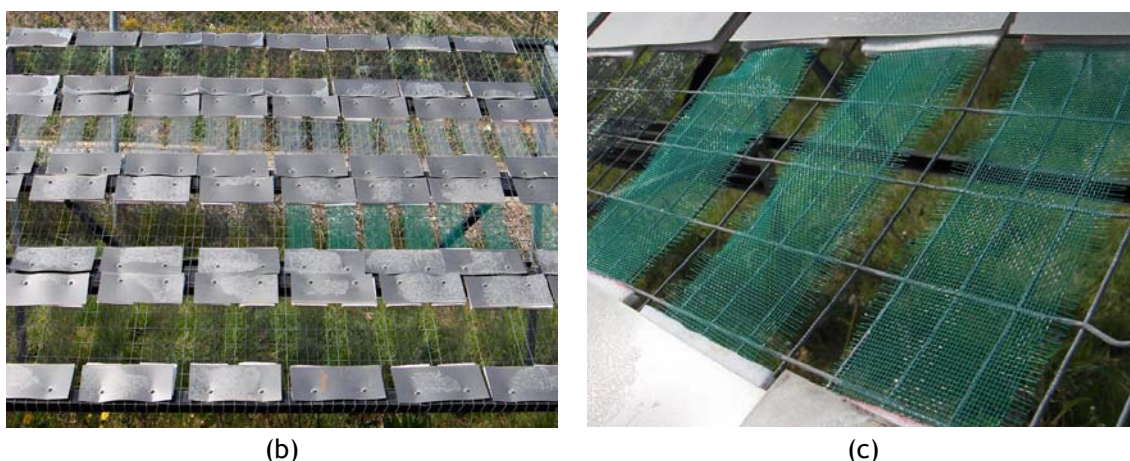


Figura 12.17 - Georredes expostas aos agentes climáticos reais: (a) e (b) vista geral de vários provetes expostos; (c) pormenor de alguns provetes da georrede V0.

As georredes foram expostas aos agentes climáticos reais durante 24 meses (entre Abril de 2007 e Abril de 2009), ao longo dos quais foram regularmente (de 6 em 6 meses) recolhidos provetes para caracterização mecânica (ensaios de tracção-extensão segundo a norma NP EN ISO 13934-1).

### 12.9.2 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climáticos

Durante o período de exposição das georredes aos agentes climáticos reais, foram continuamente registados alguns parâmetros meteorológicos do local de exposição. Os valores da temperatura (em °C) e da velocidade do vento (em  $\text{km.h}^{-1}$ ) (valores horários) foram gentilmente cedidos pela LIPOR II; os valores da radiação solar global (de 300 a 3000 nm, em  $\text{MJ.m}^{-2}$ ) (valores horários acumulados) e da precipitação (em mm) (valores diários acumulados) foram obtidos no Instituto de Meteorologia, I.P. - Portugal (estação meteorológica do Porto/Pedras Rubras). A caracterização meteorológica do local de exposição encontra-se nas Figuras 12.18 (temperatura), 12.19 (radiação solar global), 12.20 (precipitação) e 12.21 (velocidade do vento).

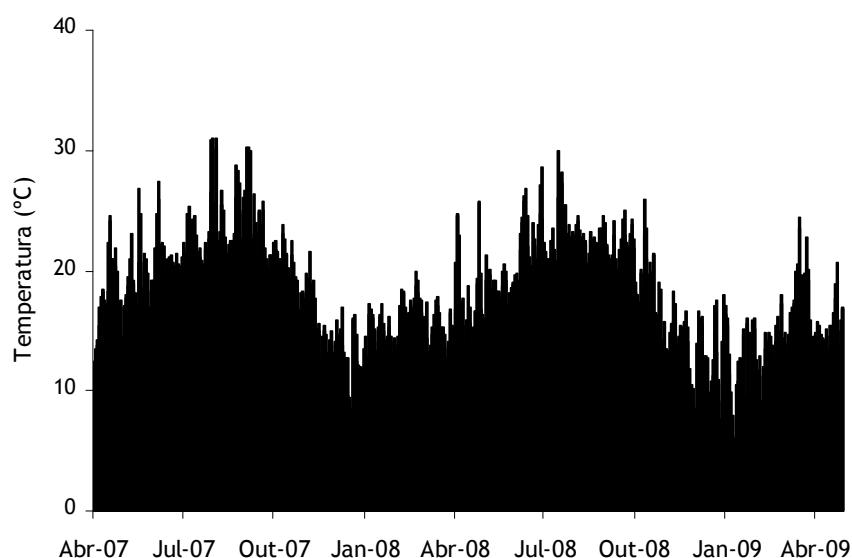


Figura 12.18 - Temperatura média diária entre Abril de 2007 e Abril de 2009.

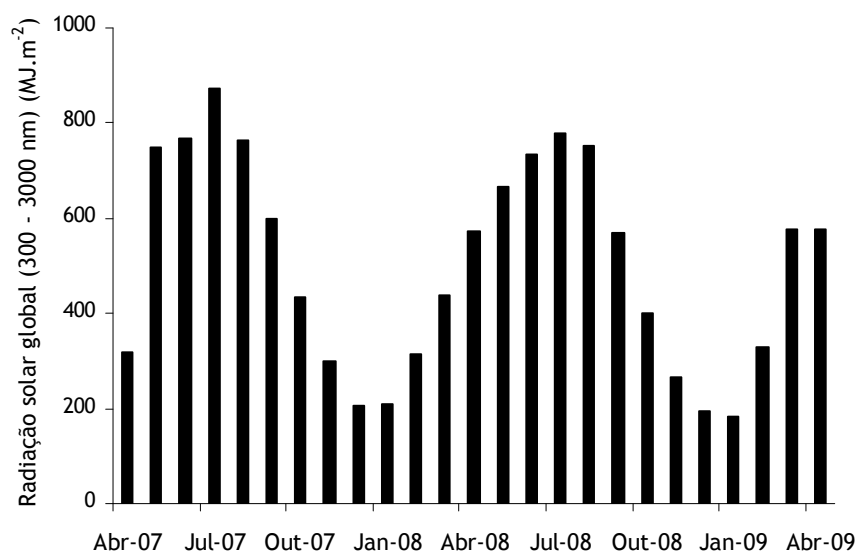


Figura 12.19 - Radiação solar global (300 nm a 3000 nm) acumulada mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.

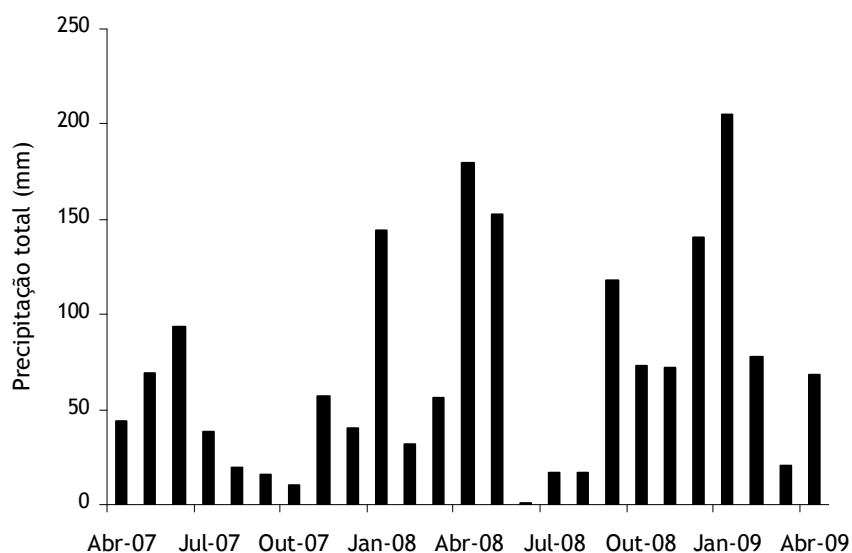


Figura 12.20 - Precipitação acumulada mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.

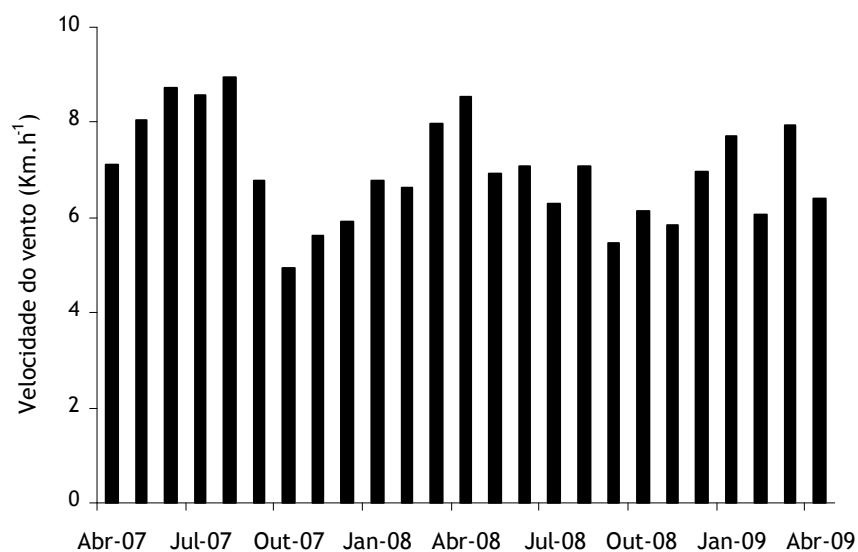


Figura 12.21 - Velocidade do vento média mensal entre Abril de 2007 e Abril de 2009.

A temperatura média do ar foi mais elevada nos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro (médias mensais acima dos 21,0 °C). Os meses mais quentes foram Agosto de 2007 (média mensal de 24,2 °C) e Setembro de 2007 (média mensal de 23,8 °C), enquanto que os meses mais frios foram Janeiro de 2009 (média mensal de 12,1 °C) e Dezembro de 2008 (média mensal de 13,0 °C). O dia mais quente foi 3 de Agosto de 2007 (média diária de 31,1 °C) e o dia mais frio foi 9 de Janeiro de 2009 (média diária de 4,0 °C) (ocorrência de neve a 9 de Janeiro de 2009).

A radiação solar incidente foi maior nos meses de Julho de 2007 e Julho de 2008 (radiação incidente total de 871,7 e 777,6 MJ.m<sup>-2</sup>, respectivamente) e menor nos meses de Janeiro de 2009 e Dezembro de 2008 (radiação incidente total de 182,2 e 196,3 MJ.m<sup>-2</sup>, respectivamente).

Os meses mais chuvosos foram Janeiro de 2009 e Abril de 2008 (precipitação total de 205 e 180 mm, respectivamente); os meses mais secos foram Junho de 2008 e Outubro de 2007 (precipitação total de 1 e 10 mm, respectivamente). O dia mais chuvoso foi 22 de Setembro de 2008 (precipitação total de 54 mm).

A velocidade do vento foi mais elevada em Agosto de 2007 (média mensal de 9,0 Km.h<sup>-1</sup>). O dia com maior intensidade de vento foi 19 de Dezembro de 2007 (média diária de 22,5 Km.h<sup>-1</sup>). A velocidade máxima atingida pelo vento foi registada a 5 de Março de 2009 (velocidade de 82,8 Km.h<sup>-1</sup>).

O Quadro 12.37 resume, para os diferentes tempos de exposição, os valores totais da radiação solar incidente e da precipitação, bem como os valores médios da temperatura e da velocidade do vento, a que as georredes estiveram sujeitas durante a exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 12.37 - Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total e velocidade do vento média a que as georredes estiveram sujeitas durante os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo de exposição (meses) | Temperatura média do ar (°C) | Radiação solar incidente total* (MJ.m <sup>-2</sup> ) | Precipitação total (mm) | Velocidade do vento média (Km.h <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|------------------------------|---|-------------------------|---|
| 6                          | 22,0                         | 3993  | 279                     | 7,9   |
| 12                         | 18,8                         | 5948  | 725                     | 7,3   |
| 18                         | 19,7                         | 9945  | 1127                    | 7,1   |
| 24                         | 18,3                         | 11938   | 1725                    | 7,0   |

(\*entre os 300 nm e os 3000 nm)

### 12.9.3 - Georrede B0

A georrede B0 não apresentava danos visíveis após 24 meses de exposição aos agentes climáticos. O Quadro 12.38 mostra os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e depois dos diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual podem ser encontrados no Quadro 12.39. A Figura 12.22 ilustra as curvas médias força-extensão da georrede B0, obtidas antes e no final da exposição aos agentes climáticos reais.



Quadro 12.38 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 12,7 (2,6%)                                  | 21,4 (5,8%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 11,8 (1,3%)                                  | 21,2 (9,5%)                  | <b>92,9</b>              |
| 12 Meses | 10,7 (1,4%)                                  | 20,6 (7,5%)                  | <b>84,3</b>              |
| 18 Meses | 12,8 (3,0%)                                  | 21,7 (7,4%)                  | <b>101</b>               |
| 24 Meses | 12,0 (2,2%)                                  | 21,2 (9,2%)                  | <b>94,5</b>              |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.39 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | J <sub>SEC</sub> 2% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | J <sub>SEC</sub> 5% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | J <sub>SEC</sub> 10% ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|----------|--|--|---|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 104  | 89,9                                       | 83,0  | 291                             | ---                   |
| 6 Meses  | 108  | 91,4                                       | 80,3  | 279                             | <b>95,9</b>           |
| 12 Meses | 99,4                                       | 83,5                                       | 73,1  | 295                             | <b>101</b>            |
| 18 Meses | 115  | 99,3                                       | 86,3  | 295                             | <b>101</b>            |
| 24 Meses | 109  | 93,1                                       | 81,6  | 284                             | <b>97,6</b>           |

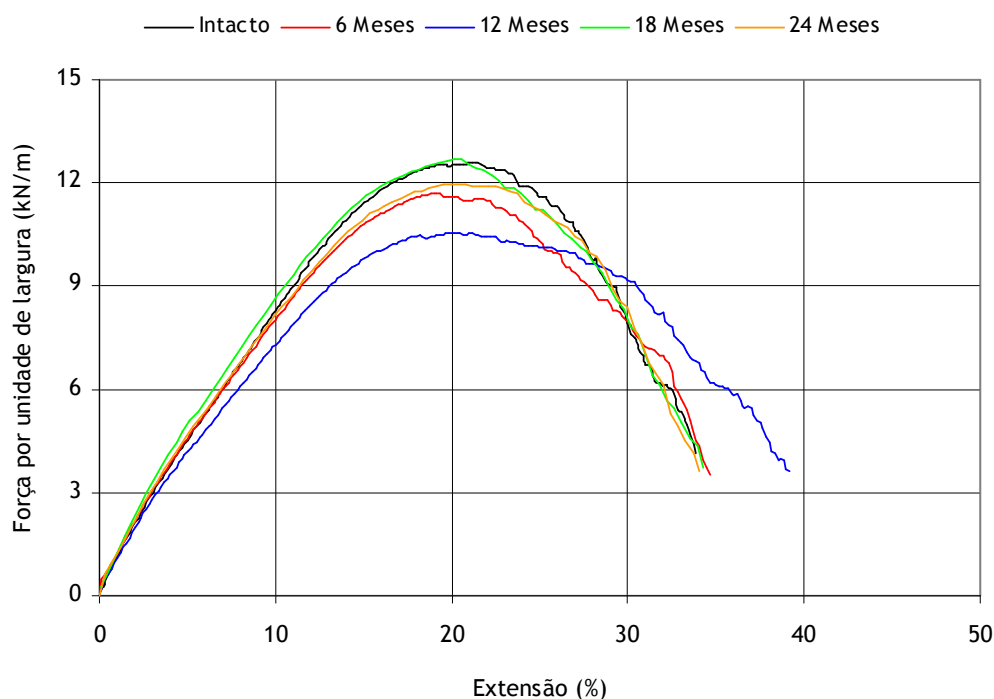


Figura 12.22 - Curvas médias força-extensão da georrede B0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A resistência à tracção da georrede B0 não sofreu alterações muito relevantes após a exposição aos agentes climáticos reais (excepção aos 12 meses de exposição). De facto, no fim dos 24 meses de exposição, a georrede B0 ainda possuía uma resistência residual bastante elevada (94,5%).

Ao fim de 12 meses de exposição, a resistência residual da georrede B0 era de 84,3% (o que parecia indicar a ocorrência de alguma degradação). No entanto, após 18 meses de exposição, o valor deste parâmetro era de 101% (resistência residual de 94,5% depois de 24 meses de exposição). É de notar que, e como se verá mais à frente, a resistência residual das outras georredes também sofreu uma diminuição aos 12 meses de exposição (resistências residuais entre os 89,0% e os 90,2%) e, ao fim de 18 meses de exposição, apresentavam resistências residuais próximas de 100%. Assim, a diminuição da resistência à tracção da georrede B0 (e das restantes georredes) após 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais poderá ter sido provocada pela ocorrência de algum erro sistemático (não detectado) durante os ensaios de tracção-extensão.

A extensão na força máxima e a robustez da georrede B0 não variaram significativamente durante a exposição aos agentes climáticos reais. De um modo geral, a rigidez secante do material também não sofreu grandes alterações devido à exposição ao ar livre.

A exposição durante 24 meses aos agentes climáticos reais provocou menos danos na georrede B0 do que 1000 horas de exposição no QUV. De facto, após 1000 horas de exposição no QUV, a georrede B0 possuía uma resistência residual de 39,8% e uma robustez residual de 5,5%. O aumento do tempo de exposição da georrede B0 aos agentes climáticos reais iria certamente originar o aparecimento de danos mecânicos no material (no QUV, destruição completa após 2000 horas de exposição).

Quando comparada com os geotêxteis B0-280 e B0-500 (100% PP) (Capítulo 10), a georrede B0 (100% PEAD) apresentou uma boa resistência aos agentes climáticos reais (os geotêxteis B0-280 e B0-500 estavam completamente destruídos após 24 meses de exposição). Assim, os materiais de PEAD não estabilizados possuem maior resistência aos agentes climáticos reais do que os materiais de PP não estabilizados.

#### 12.9.4 - Georrede B2

Tal como a georrede B0, a georrede B2 (e as restantes georredes) também não possuía danos visíveis após 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais. As propriedades mecânicas da georrede B2, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidas nos Quadros 12.40 e 12.41. As respectivas curvas médias força-extensão são apresentadas na Figura 12.23.

Quadro 12.40 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,3 (2,6%)                                  | 22,6 (7,5%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 13,1 (1,0%)                                  | 24,3 (9,4%)                  | <b>98,5</b>              |
| 12 Meses | 12,0 (3,3%)                                  | 30,6 (24%)                   | <b>90,2</b>              |
| 18 Meses | 14,3 (2,9%)                                  | 22,0 (7,6%)                  | <b>108</b>               |
| 24 Meses | 14,1 (0,8%)                                  | 20,2 (8,0%)                  | <b>106</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.41 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | J <sub>SEC</sub> 2%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10%<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|--|--|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 104  | 91,4   | 84,8  | 377                               | ---                      |
| 6 Meses  | 102  | 93,1   | 83,8  | 403                               | <b>107</b>               |
| 12 Meses | 97,3   | 86,5   | 76,9  | 442                               | <b>117</b>               |
| 18 Meses | 121  | 105  | 92,3  | 413                               | <b>110</b>               |
| 24 Meses | 110  | 103  | 94,6  | 316                               | <b>83,8</b>              |

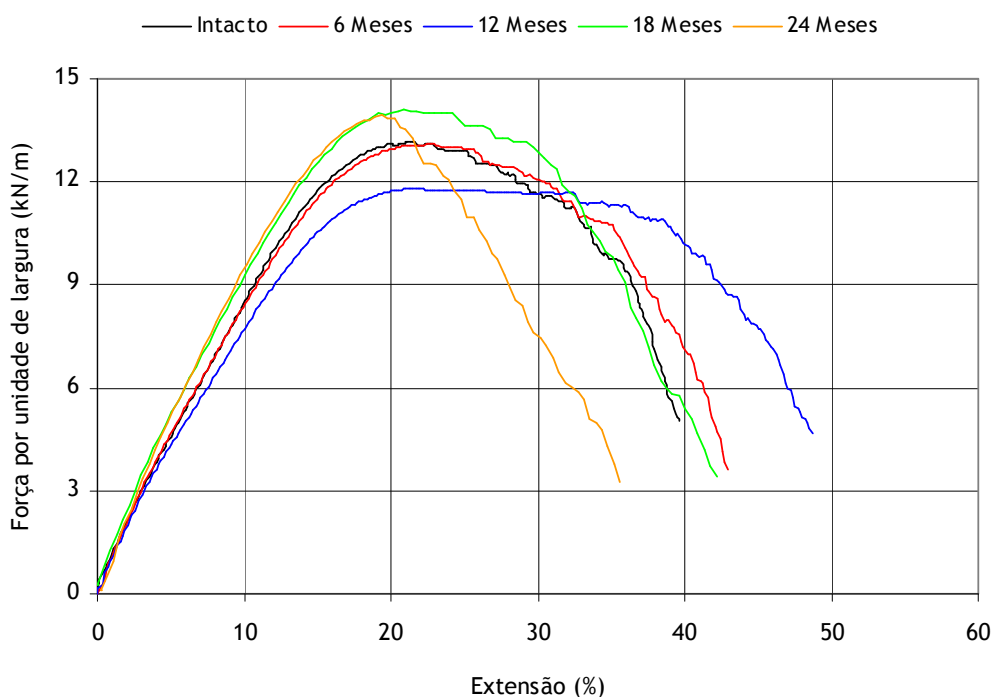


Figura 12.23 - Curvas médias força-extensão da georrede B2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

A exposição aos agentes climáticos reais não causou alterações muito significativas na resistência à tracção e na extensão na força máxima da georrede B0 (a excepção observada depois de 12 meses de exposição foi abordada no ponto anterior). De facto, após 24 meses de exposição, a georrede B2 possuía uma resistência residual de 106% e uma extensão na força máxima de 20,2% (extensão na força máxima original de 22,6%).

A rigidez secante também não sofreu grandes variações devido à exposição aos agentes climáticos reais (apenas um ligeiro aumento após 18 e 24 meses de exposição). Com excepção aos 24 meses de exposição (robustez residual de 83,8%), a robustez do material não diminuiu com a exposição ao ar livre.

De um modo geral, o comportamento da georrede B2 durante a exposição aos agentes climáticos reais foi idêntico ao comportamento da georrede B0. Assim, 24 meses de exposição, não permitiram distinguir, em termos de resistência aos agentes em consideração, a georrede B2 da georrede B0.



O aumento do intervalo de exposição ao ar livre poderá permitir distinguir as georredes B0 e B2, em termos de resistência aos agentes climáticos reais. Nessa situação, é previsível que a degradação da georrede B0 ocorra primeiro que a degradação da georrede B2 (tal como aconteceu na simulação laboratorial no QUV). A (previsível) maior resistência da georrede B2 aos agentes climáticos reais será devida ao efeito protector do aditivo T783.

#### 12.9.5 - Georrede P0

O Quadro 12.42 resume os valores da resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e depois dos vários tempos de exposição aos agentes climáticos. Os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual podem ser encontrados no Quadro 12.43. As respectivas curvas médias força-extensão estão representadas na Figura 12.24.

Quadro 12.42 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção (kN.m <sup>-1</sup> ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|---|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 12,7 (2,2%)                                 | 22,6 (6,8%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 13,2 (1,8%)                                 | 24,6 (9,3%)                  | <b>104</b>               |
| 12 Meses | 11,3 (1,1%)                                 | 22,1 (3,2%)                  | <b>89,0</b>              |
| 18 Meses | 13,7 (1,7%)                                 | 22,4 (5,4%)                  | <b>108</b>               |
| 24 Meses | 13,7 (2,4%)                                 | 23,4 (7,0%)                  | <b>108</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.43 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | J <sub>SEC</sub> 2% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 5% (kN.m <sup>-1</sup> ) | J <sub>SEC</sub> 10% (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez (kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez residual (%) |
|----------|---|---|--|--------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 96,7                                      | 87,7                                      | 82,3                                       | 320                            | ---                   |
| 6 Meses  | 104                                       | 90,6                                      | 80,7                                       | 373                            | <b>117</b>            |
| 12 Meses | 98,0                                      | 84,2                                      | 74,4                                       | 346                            | <b>108</b>            |
| 18 Meses | 116                                       | 100                                       | 89,1                                       | 350                            | <b>109</b>            |
| 24 Meses | 101                                       | 93,7                                      | 85,4                                       | 345                            | <b>108</b>            |

De um modo geral, o comportamento da georrede P0 durante a exposição aos agentes climáticos reais foi muito idêntico ao comportamento das georredes B0 e B2: a resistência à tracção (com uma excepção após 12 meses de exposição), a extensão na força máxima, a rigidez secante e a robustez não sofreram grandes alterações. A exposição durante 24 meses ao ar livre não permitiu distinguir, em termos de resistência aos agentes climáticos reais, as georredes P0 e B0; a distinção entre os dois materiais poderia ser conseguida através do aumento do tempo de exposição (nessa situação, é previsível que a degradação da georrede B0 ocorra primeiro que a degradação da georrede P0).

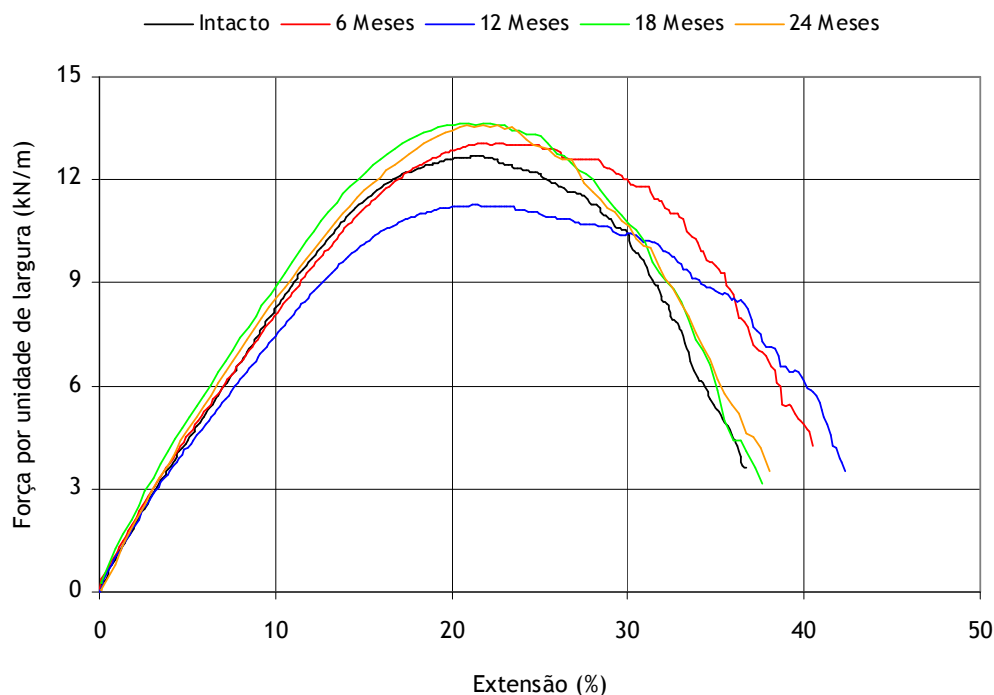


Figura 12.24 - Curvas médias força-extensão da georrede P0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

#### 12.9.6 - Georrede P2

O Quadro 12.44 mostra os valores obtidos para a resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após a exposição aos agentes climáticos reais. Por sua vez, os valores da rigidez secante, robustez e robustez residual encontram-se no Quadro 12.45. As curvas médias força-extensão da georrede P2, obtidas antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais, estão ilustradas na Figura 12.25.

Quadro 12.44 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,0 (5,7%)                                  | 22,9 (5,9%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 13,8 (4,7%)                                  | 23,9 (8,2%)                  | <b>106</b>               |
| 12 Meses | 11,6 (7,0%)                                  | 25,7 (21%)                   | <b>89,2</b>              |
| 18 Meses | 13,9 (4,9%)                                  | 23,7 (4,6%)                  | <b>107</b>               |
| 24 Meses | 13,9 (9,1%)                                  | 21,9 (9,2%)                  | <b>107</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A resistência à tracção da georrede P2 não sofreu alterações significativas depois da exposição aos agentes climáticos reais (excepção após 12 meses de exposição). De facto, ao fim de 24 meses de exposição, a georrede P2 apresentava uma resistência residual de 107%. Relativamente à extensão na força máxima, ocorreram apenas pequenas variações em consequência da exposição aos agentes climáticos reais.

Quadro 12.45 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{SEC} 2\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 5\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | $J_{SEC} 10\%$<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>(kN.m <sup>-1</sup> ) | Robustez<br>residual (%) |
|----------|--|--|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 89,4                                   | 83,8                                   | 79,3                                    | 339                               | ---                      |
| 6 Meses  | 78,9                                   | 79,8                                   | 77,8                                    | 319                               | <b>94,1</b>              |
| 12 Meses | 82,0                                   | 75,8                                   | 69,3                                    | 361                               | <b>106</b>               |
| 18 Meses | 104                                    | 92,1                                   | 83,4                                    | 355                               | <b>105</b>               |
| 24 Meses | 99,0                                   | 94,7                                   | 87,3                                    | 323                               | <b>95,3</b>              |

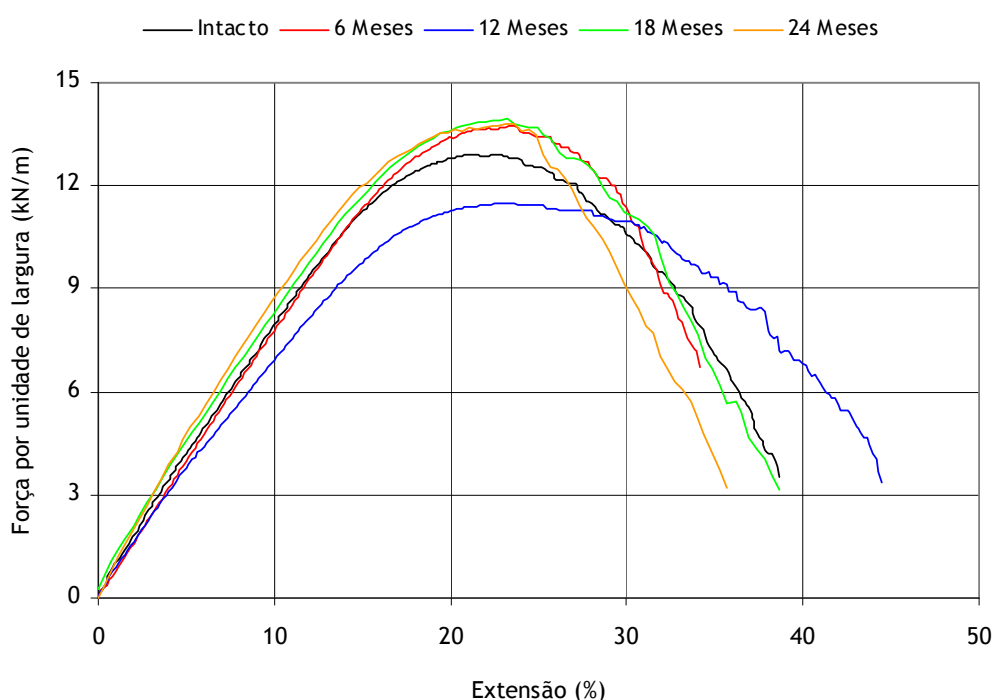


Figura 12.25 - Curvas médias força-extensão da georrede P2, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

De um modo geral, a rigidez secante da georrede P2 sofreu algumas pequenas variações durante a exposição aos agentes climáticos reais. Estes agentes não originaram alterações muito relevantes na robustez do material (ao fim de 24 meses de exposição, robustez residual de 95,3%).

À semelhança das georredes B0, B2 e P0, a georrede P2 também apresentou uma boa resistência aos agentes climáticos reais. Os 24 meses de exposição em condições reais (tal como as 4000 horas de exposição em laboratório) também não permitiram distinguir, em termos de resistência aos agentes climáticos, as georredes P2 e P0. O aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais poderá permitir a distinção dos dois materiais (a única diferença entre os materiais é a presença, ou não, do aditivo T783); nessa situação, é previsível que a degradação na georrede P0 ocorra primeiro que a degradação na georrede P2 (devido à inexistência de uma protecção extra por parte do T783).

## 12.9.7 - Georrede V0

As propriedades mecânicas da georrede V0, obtidas antes e após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidas nos Quadros 12.46 e 12.47. As respectivas curvas médias força-extensão estão representadas na Figura 12.26.

Quadro 12.46 - Resistência à tracção, extensão na força máxima e resistência residual da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | Resistência à tracção ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Extensão na força máxima (%) | Resistência residual (%) |
|----------|--|------------------------------|--------------------------|
| Intacto  | 13,6 (1,8%)                                  | 23,8 (8,9%)                  | ---                      |
| 6 Meses  | 13,9 (1,5%)                                  | 25,9 (9,9%)                  | <b>102</b>               |
| 12 Meses | 12,1 (1,2%)                                  | 26,4 (9,6%)                  | <b>89,0</b>              |
| 18 Meses | 14,4 (2,7%)                                  | 23,5 (7,4%)                  | <b>106</b>               |
| 24 Meses | 13,6 (1,9%)                                  | 24,4 (7,4%)                  | <b>100</b>               |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 12.47 - Rigidez secante, robustez e robustez residual da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | $J_{\text{SEC}} 2\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 5\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | $J_{\text{SEC}} 10\%$ ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez ( $\text{kN.m}^{-1}$ ) | Robustez residual (%) |
|----------|---|---|--|---------------------------------|-----------------------|
| Intacto  | 74,0  | 74,2  | 73,2   | 323                             | ---                   |
| 6 Meses  | 68,4  | 70,0  | 70,6   | 345                             | <b>107</b>            |
| 12 Meses | 64,6  | 65,6  | 64,4   | 358                             | <b>111</b>            |
| 18 Meses | 84,7  | 80,3  | 78,7   | 325                             | <b>101</b>            |
| 24 Meses | 67,5  | 70,9  | 74,2   | 317                             | <b>98,1</b>           |

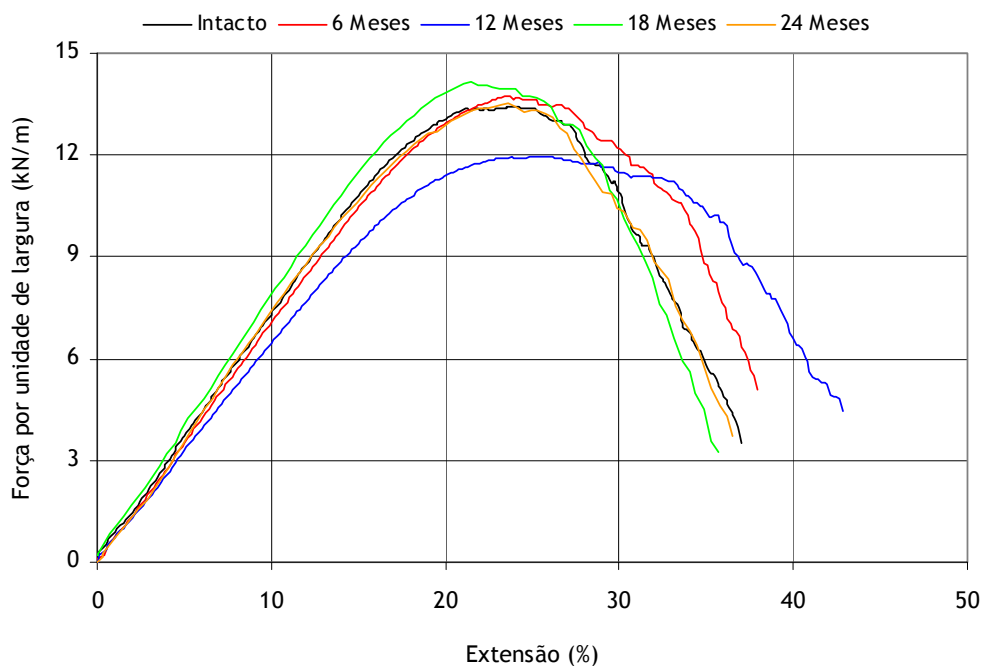


Figura 12.26 - Curvas médias força-extensão da georrede V0, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

Tal como nas georredes brancas e pretas, também não ocorreram alterações muito significativas na resistência à tracção da georrede V0 durante a exposição aos agentes climáticos reais (a excepção observada aos 12 meses de exposição foi abordada no ponto 12.9.3). A respectiva extensão na força máxima evidenciou apenas pequenas alterações devido à exposição ao clima. As variações ocorridas na rigidez secante e na robustez também foram pouco significativas.

A exposição durante 24 meses aos agentes climáticos reais causou menos danos na georrede V0 do que 2000 horas de exposição no QUV. De facto, após 2000 horas de exposição no QUV, a georrede V0 apresentava uma resistência residual de 81,6% e uma robustez residual de 90,1%.

De um modo geral, o comportamento da georrede V0 durante os 24 meses de exposição aos agentes climáticos reais foi muito idêntico ao comportamento das georredes B0 e P0. Assim, e ao contrário das 4000 horas de exposição no QUV, os 24 meses de exposição em condições reais não permitiram distinguir, em termos de resistência aos agentes climáticos, as georredes B0, P0 e V0. O aumento do tempo de exposição poderia permitir a distinção dos materiais; além disso, poderia confirmar, ou não, a previsão obtida na simulação laboratorial no QUV de que a incorporação de negro de carbono nas georredes de PEAD resulta numa maior protecção dos materiais (contra os agentes climáticos) do que a incorporação do pigmento verde.

### 12.10 - Considerações finais

Neste capítulo, procedeu-se à avaliação da resistência de cinco georredes de PEAD (com diferentes composições químicas) a vários agentes de degradação: imersão em soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio, exposição à termo-oxidação (através do método do forno e pelo novo método) e exposição aos agentes climáticos (sob condições reais e sob condições simuladas em laboratório). Por limitações de tempo, o estudo realizado para as georredes de PEAD não foi tão extenso como o estudo realizado para os geotêxteis de PP (estudo apresentado na Parte II deste trabalho).

As georredes (mesmo a georrede B0, não estabilizada) apresentaram uma boa resistência à oxidação induzida pela temperatura (método do forno). Assim, o método do forno não permitiu distinguir, em termos de resistência à oxidação e em 56 dias de exposição, as diferentes georredes com diferentes composições químicas (o aumento do tempo de exposição poderia permitir distinguir os materiais).

Os ensaios de termo-oxidação pelo novo método permitiram distinguir, em termos de resistência à oxidação, a georrede B0 da georrede B2 (o que mostrou a importância do aditivo T783 na protecção das georredes de PEAD contra a oxidação induzida pela temperatura). Deste modo, o novo método permitiu distinguir materiais que não o foram pelo método do forno (mostrando, mais uma vez, que é uma ferramenta muito útil para a avaliação da resistência dos geossintéticos à termo-oxidação).

A georrede B0 não resistiu aos agentes climáticos simulados no QUV (degradação total após 2000 horas de exposição). A degradação das georredes de PEAD foi bastante retardada pela incorporação de T783; o negro de carbono e o pigmento verde também causaram um aumento da resistência das georredes de PEAD aos agentes climáticos simulados em laboratório (a presença de negro carbono resultou numa maior protecção do que a presença do pigmento verde).

As georredes apresentaram uma resistência muito elevada aos agentes climáticos reais (não foram encontrados danos significativos nos materiais após 24 meses de exposição). Assim, os 24 meses de exposição ao ar livre não permitiram distinguir, em termos de resistência aos agentes climáticos, as diferentes georredes (o aumento do tempo de exposição poderia permitir distinguir os materiais).

As georredes de PEAD apresentaram maior resistência à termo-oxidação e aos agentes climáticos do que os geotêxteis de PP. De facto, (1) o geotêxtil B0-280 (100% PP) estava totalmente destruído após 19 dias de exposição a 100 °C e a georrede B0 não possuía grandes danos; (2) a destruição dos geotêxteis B0-280 e B0-500 ocorreu após pouco mais de 250 horas no QUV (0,30 MJ.m<sup>-2</sup> de radiação incidente total a 340 nm) (georrede B0 completamente destruída após 2000 horas); (3) os geotêxteis B0-280 e B0-500 estavam totalmente destruídos após 24 meses de exposição ao ar livre (não foram encontrados danos significativos na georrede B0).

# CAPÍTULO 13

## Resistência de geomembranas de polietileno de alta densidade a agentes de degradação químicos

### 13.1 - Introdução

As geomembranas são materiais geossintéticos bastante aplicados em diversas obras de Engenharia Civil (aterros de resíduos, canais, reservatórios, barragens, entre outros) com o objectivo principal de promover a retenção de líquidos ou de gases. Em algumas aplicações, as geomembranas podem estar sujeitas à acção de vários agentes de degradação físicos e/ou químicos que lhes podem causar danos (afectando o seu desempenho e causando uma diminuição da sua durabilidade).

As geomembranas usadas, por exemplo, na impermeabilização dos aterros de resíduos podem estar expostas à acção dos lixiviados, do biogás e a temperaturas moderadamente elevadas (resultantes do processo de degradação dos resíduos) durante um período de tempo muito longo (vários anos). As geomembranas poderão também estar expostas aos agentes climáticos, por um período de tempo mais ou menos longo, durante a fase de construção e, eventualmente, durante a fase de exploração dos aterros de resíduos.

A degradação das geomembranas aplicadas nos aterros de resíduos (e noutras aplicações) poderá ter consequências muito graves para o meio ambiente envolvente (uma geomembrana danificada pode não conseguir reter os lixiviados, libertando-os para o solo). Deste modo, é muito importante avaliar a resistência das geomembranas aos vários agentes de degradação físicos e químicos; além disso, é imperativo que as geomembranas aplicadas nos aterros de resíduos (e noutras estruturas com risco ambiental elevado) possuam uma resistência muito elevada a esses agentes.

Neste capítulo, procede-se à avaliação da resistência de duas geomembranas de polietileno de alta densidade a vários agentes de degradação químicos. As geomembranas foram imersas em soluções ácidas e alcalinas, expostas à termo-oxidação (através do método do forno) e expostas aos agentes climáticos (sob condições artificiais e sob condições reais).

### 13.2 - Geomembranas

Neste trabalho, foram estudadas duas geomembranas de PEAD (materiais disponíveis no mercado), uma com a superfície lisa (espessura de 2,00 mm) e a outra com a superfície rugosa (espessura de 1,50 mm) (Figura 13.1). As geomembranas de PEAD foram designadas por “geomembrana lisa” e por “geomembrana rugosa”.

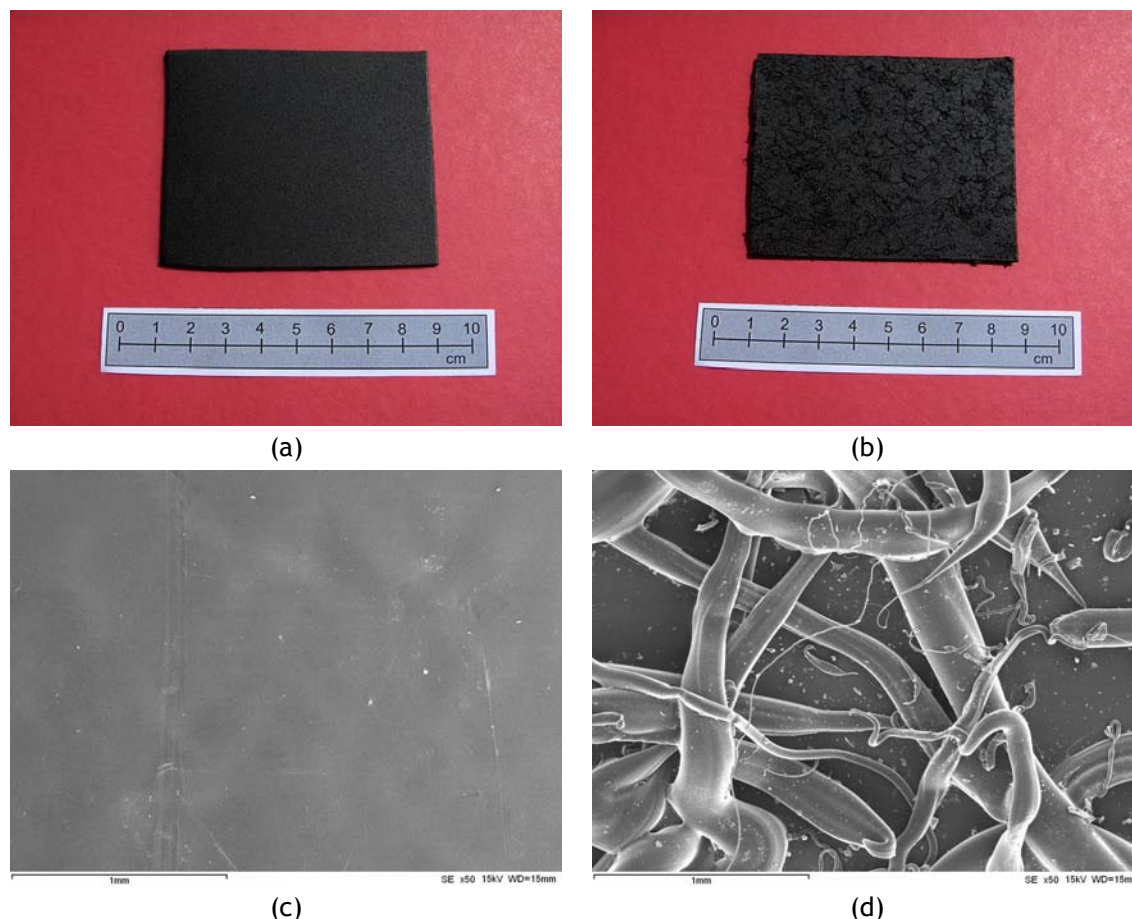


Figura 13.1 - Geomembranas estudadas neste trabalho: (a) geomembrana lisa; (b) geomembrana rugosa; (c) geomembrana lisa (imagem de MEV x50); (d) geomembrana rugosa (imagem de MEV x50).

As geomembranas estavam protegidas contra a radiação UV e contra a termo-oxidação. No entanto, não foram fornecidas informações acerca do tipo e da quantidade dos aditivos presentes. A ausência de informações sobre a composição química é uma grande limitação na avaliação da resistência dos geossintéticos aos vários agentes de degradação (na presença dessa informação e tendo um material idêntico não estabilizado, poderá ser possível avaliar o efeito, se algum, dos aditivos químicos para o aumento da resistência dos geossintéticos aos diferentes agentes de degradação). Os provetes das geomembranas (de referência e para exposição aos agentes de degradação) foram todos cortados na direcção de fabrico.

### 13.3 - Avaliação da danificação sofrida pelas geomembranas

#### 13.3.1 - Considerações iniciais

Os danos sofridos pelas geomembranas durante a exposição aos vários agentes de degradação foram avaliados através de ensaios de tracção-deformação e de rasgamento; os resultados obtidos para os provetes expostos foram comparados com os resultados obtidos para os provetes de referência (sem degradação). Em seguida, procede-se à descrição dos ensaios mecânicos de tracção-deformação e de rasgamento das geomembranas (equipamentos, principais características dos ensaios e resultados de um ensaio tipo).



### 13.3.2 - Ensaios de tracção-deformação

Os ensaios de tracção-deformação das geomembranas foram realizados seguindo os procedimentos da norma ASTM D638-08 (*Standard test method for tensile properties of plastics*); as principais características dos ensaios podem ser encontradas no Quadro 13.1. A norma ASTM D638 descreve um método para a determinação das propriedades mecânicas de plásticos (espessura até 14 mm), com a particularidade dos provetes possuíram a forma de “halteres” (Figura 13.2).

Quadro 13.1 - Condições experimentais dos ensaios de tracção-deformação (ASTM D638).

| Largura <sub>Proвете</sub> * | Comprimento <sub>Proвете</sub> ** | n <sub>Provetes</sub> *** | Velocidade              |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 6 mm                         | 64 mm                             | 5                         | 50 mm.min <sup>-1</sup> |

(\*largura na zona central; \*\*comprimento entre garras; \*\*\*número mínimo)

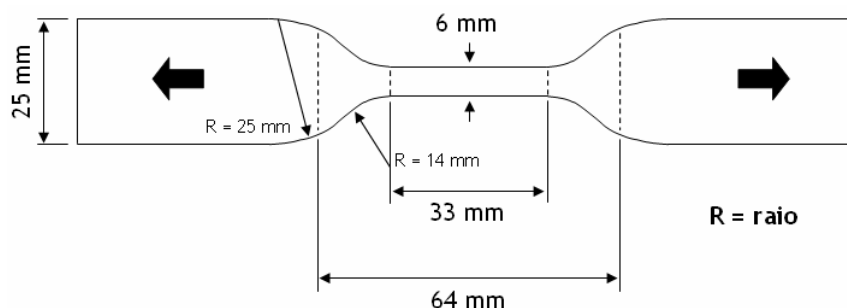


Figura 13.2 - Proвете em forma de “halteres” (de acordo com a ASTM D638).

Em termos gerais, os procedimentos dos ensaios de tracção-deformação de acordo com a ASTM D638 são idênticos aos procedimentos dos ensaios de tracção-extensão (NP EN ISO 10319, NP EN 29073-3 ou NP EN ISO 13934-1). No entanto, antes dos ensaios de tracção-deformação de acordo com a ASTM D638, é necessário medir a espessura e a largura dos provetes (medições em vários pontos na zona central do provete); estes dados são necessários para determinar a área de secção mínima de cada um dos provetes (a área de secção mínima é necessária para o cálculo da tensão dos provetes). A Figura 13.3 ilustra um ensaio de tracção-deformação de uma geomembrana.

Os equipamentos usados nos ensaios de tracção-deformação das geomembranas (segundo a ASTM D638) foram os mesmos utilizados nos ensaios de tracção-extensão dos geotêxteis e das georredes (a descrição dos equipamentos usados pode ser encontrada no ponto 4.5.2). Os provetes foram fixados com garras de compressão hidráulica (em alternativa, podiam ter sido usadas garras de compressão pneumática ou garras em cunha metálica). A espessura de cada um dos provetes (medições na zona central) foi medida com um relógio comparador (precisão de 0,01 mm); a respectiva largura (mesma zona de medição) foi medida com uma craveira (precisão de 0,02 mm).

A curva tensão-deformação de uma geomembrana possui normalmente 2 zonas: a zona de cedência e a de rotura (Figura 13.4). Os resultados dos ensaios de tracção-deformação incluem geralmente os valores médios da tensão na cedência ( $T_{CEDÊNCIA}$ ), tensão na rotura ( $T_{ROTURA}$ ), deformação na cedência ( $D_{CEDÊNCIA}$ ), deformação na rotura ( $D_{ROTURA}$ ) e do módulo de deformabilidade inicial (MD).

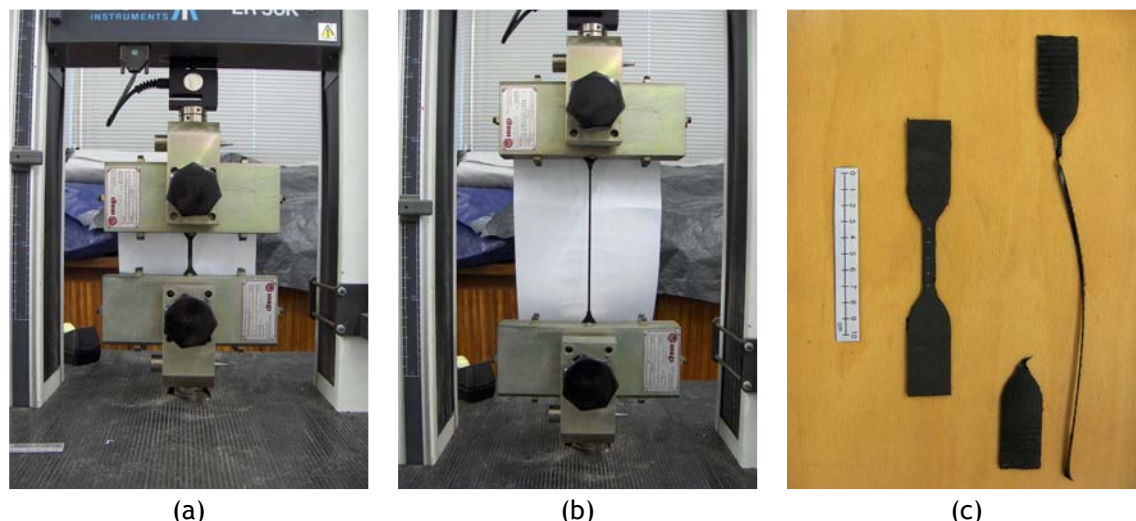


Figura 13.3 - Ensaio de tracção-deformação de uma geomembrana segundo a norma ASTM D638: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) provete antes (à esquerda) e após o ensaio (à direita).

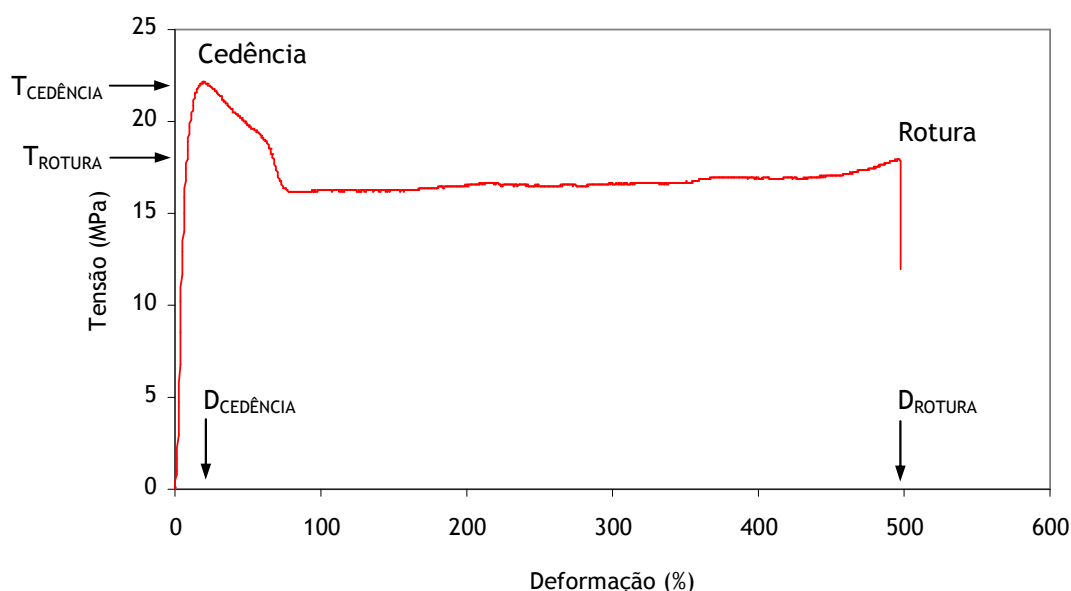


Figura 13.4 - Curva tensão-deformação obtida para a geomembrana lisa.

A tensão (em Pa) é obtida pela divisão da força máxima (na cedência ou na rotura) (em N) pela área da secção mínima do provete (em  $m^2$ ). O módulo de deformabilidade (em Pa) é determinado através do cálculo do declive da porção inicial linear da curva tensão-deformação.

Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos num ensaio de tracção-deformação de 5 provetes intactos da geomembrana lisa (provetes ensaiados na direcção de fabrico). O Quadro 13.2 resume os valores da espessura e da largura necessários para a determinação da área de secção mínima de um dos provetes. As áreas de secção mínimas foram usadas para a determinação da tensão na cedência de cada um dos 5 provetes da geomembrana lisa (Quadro 13.3) (a determinação da tensão na rotura foi efectuada de um modo semelhante). O Quadro 13.4 apresenta os valores médios dos parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de tracção-deformação de 5 provetes intactos da geomembrana lisa, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 13.2 - Determinação da área de secção mínima de um provete da geomembrana lisa.

| Proвете 1             | 10 <sup>3</sup> (Largura)<br>(m) | 10 <sup>3</sup> (Espessura)<br>(m) | 10 <sup>6</sup> (Área de secção)<br>(m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|
| Zona A                | 1,96                             | 5,76                               | 11,3  |
| Zona B                | 2,02                             | 5,82                               | 11,8  |
| Zona C                | 1,98                             | 5,74                               | 11,4  |
| Zona D                | 1,98                             | 5,82                               | 11,5  |
| Zona E                | 1,96                             | 5,86                               | 11,5  |
| Área de secção mínima |                                  |                                    | 11,3  |

Quadro 13.3 - Determinação da tensão na cedência dos 5 provetes da geomembrana lisa.

| Proвете       | 10 <sup>6</sup> (Área de secção<br>mínima) (m <sup>2</sup> ) | Força máxima na<br>cedência (N) | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) |
|---------------|--|---------------------------------|--------------------------------|
| 1             | 11,3   | 257                             | 22,7                           |
| 2             | 11,7   | 255                             | 21,8                           |
| 3             | 11,4   | 257                             | 22,5                           |
| 4             | 11,4   | 260                             | 22,8                           |
| 5             | 11,3   | 255                             | 22,6                           |
| Valor médio   | ---  | 257                             | 22,5                           |
| Desvio padrão | ---  | 2                               | 0,4                            |
| CV (%)        | ---  | 0,8                             | 1,8                            |

(CV - coeficiente de variação)

Quadro 13.4 - Resultados obtidos nos ensaios de tracção-deformação de 5 provetes intactos da geomembrana lisa de acordo com a norma ASTM D638.

| Proвете       | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa) |
|---------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|
| 1             | 22,7                           | 18,4                         | 20,3                         | 550                        | 231         |
| 2             | 21,8                           | 17,5                         | 21,5                         | 567                        | 221         |
| 3             | 22,5                           | 18,3                         | 20,6                         | 583                        | 227         |
| 4             | 22,8                           | 17,0                         | 19,7                         | 289                        | 231         |
| 5             | 22,6                           | 17,3                         | 21,8                         | 466                        | 226         |
| Valor médio   | 22,5                           | 17,7                         | 20,8                         | 491                        | 227         |
| Desvio padrão | 0,4                            | 0,6                          | 0,9                          | 122                        | 4           |
| CV (%)        | 1,8                            | 3,5                          | 4,2                          | 25                         | 1,8         |

(CV - coeficiente de variação)

### 13.3.3 - Ensaios de rasgamento

A resistência ao rasgamento ( $R_{\text{RASGAMENTO}}$ ) das geomembranas foi determinada de acordo com a norma ASTM D1004-09 (*Standard test method for initial tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting*); as principais características dos ensaios de rasgamento encontram-se no Quadro 13.5. A Figura 13.5 ilustra o aspecto dos provetes das geomembranas usados nos ensaios de rasgamento de acordo com a norma ASTM D1004.

| Quadro 13.5 - Condições experimentais dos ensaios de rasgamento (ASTM D1004). |                                   |                           |                         |
|---|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Largura <sub>Provete</sub> *  | Comprimento <sub>Provete</sub> ** | n <sub>Provetes</sub> *** | Velocidade              |
| 12,7 mm   | 101,6 mm                          | 10                        | 51 mm.min <sup>-1</sup> |
| (*largura no centro; **comprimento entre garras; ***número mínimo)            |                                   |                           |                         |

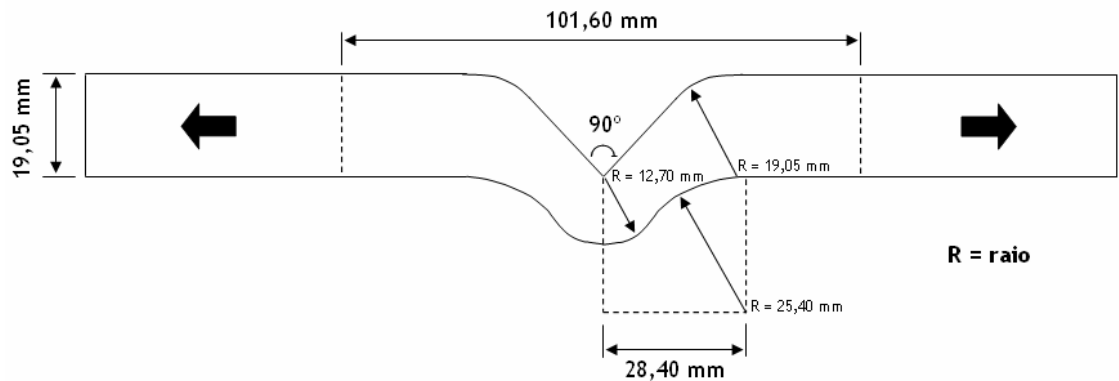


Figura 13.5 - Provetes usados nos ensaios de rasgamento de acordo com a ASTM D1004.

Os equipamentos utilizados nos ensaios de rasgamento das geomembranas (ASTM D1004) foram os mesmos usados nos ensaios de rasgamento dos geotêxteis (ponto 4.7). Os provetes foram fixados com garras de compressão hidráulica (mas também podiam ter sido usadas as garras de compressão pneumática ou as garras em cunha metálica). A Figura 13.6 ilustra um ensaio de rasgamento de uma geomembrana (em termos gerais, os procedimentos dos ensaios de rasgamento das geomembranas foram idênticos aos procedimentos dos ensaios de rasgamento dos geotêxteis).

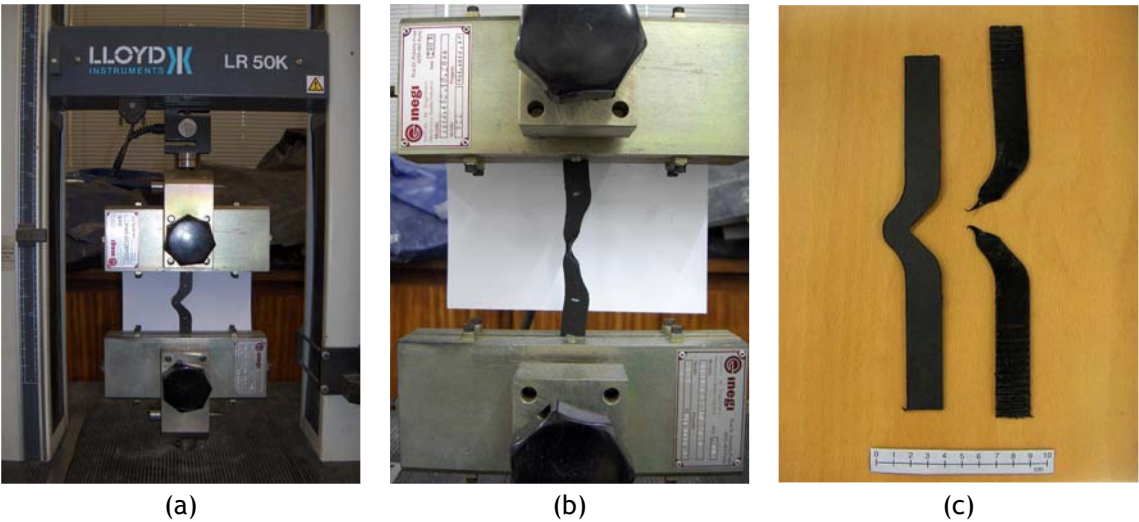


Figura 13.6 - Ensaio de rasgamento de uma geomembrana segundo a norma ASTM D1004: (a) início do ensaio; (b) durante o ensaio; (c) provete antes (à esquerda) e após o ensaio (à direita).

A  $R_{\text{RASGAMENTO}}$  (em N) de um dado provete é a força máxima registada durante o ensaio de rasgamento desse provete; o resultado final do ensaio de rasgamento é expresso pelo valor médio da  $R_{\text{RASGAMENTO}}$  de todos os provetes ensaiados (mínimo 10), acompanhado dos correspondentes desvio padrão e/ou coeficiente de variação. Os resultados obtidos num ensaio de rasgamento tipo de geomembranas são idênticos aos resultados obtidos num ensaio de rasgamento tipo de geotêxteis (Quadro 4.8).

### 13.4 - Caracterização mecânica das amostras de referência das geomembranas

O Quadro 13.6 resume os valores médios da  $T_{CEDÊNCIA}$ , da  $T_{ROTURA}$ , da  $D_{CEDÊNCIA}$ , da  $D_{ROTURA}$ , do MD e da  $R_{RASGAMENTO}$  das amostras de referência das geomembranas (lisa e rugosa), bem como os respectivos coeficientes de variação; os resultados apresentados foram obtidos a partir do ensaio de 10 provetes intactos de cada uma das geomembranas (provetes ensaiados na direcção de fabrico).

Quadro 13.6 - Parâmetros mecânicos das amostras de referência das geomembranas determinados de acordo com as normas ASTM D638 e ASTM D1004 (valores na direcção de fabrico).

| Geomembrana | $T_{CEDÊNCIA}$<br>(MPa) | $T_{ROTURA}$<br>(MPa) | $D_{CEDÊNCIA}$<br>(%) | $D_{ROTURA}$<br>(%) | MD<br>(MPa)   | $R_{RASGAMENTO}$<br>(N) |
|-------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| Lisa        | 22,5<br>(1,5%)          | 18,2<br>(7,9%)        | 20,7<br>(5,2%)        | 490<br>(34%)        | 225<br>(2,6%) | 352<br>(1,8%)           |
| Rugosa      | 21,1<br>(1,7%)          | 21,2<br>(9,4%)        | 21,0<br>(2,5%)        | 662<br>(14%)        | 191<br>(3,6%) | 275<br>(3,1%)           |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A geomembrana lisa possuía uma  $T_{CEDÊNCIA}$  (22,5 MPa) superior à  $T_{ROTURA}$  (18,2 MPa), enquanto que a geomembrana rugosa apresentava uma  $T_{CEDÊNCIA}$  (21,1 MPa) muito idêntica à  $T_{ROTURA}$  (21,2 MPa). Os coeficientes de variação obtidos para a  $T_{CEDÊNCIA}$  foram inferiores aos obtidos para a  $T_{ROTURA}$ .

A  $D_{CEDÊNCIA}$  da geomembrana lisa (20,7%) era semelhante à da geomembrana rugosa (21,0%). Por sua vez, a  $D_{ROTURA}$  da geomembrana lisa era superior à da geomembrana rugosa (deformações de 490% e de 662%, respectivamente); os coeficientes de variação associados à  $D_{ROTURA}$  eram bastante elevados (34% e 14%, respectivamente).

A geomembrana lisa era mais rígida (MD de 225 MPa) do que a geomembrana rugosa (MD de 191 MPa); os coeficientes de variação obtidos para o MD foram relativamente pequenos. A geomembrana lisa possuía uma  $R_{RASGAMENTO}$  superior à geomembrana rugosa (352 N para a geomembrana lisa e 275 N para a geomembrana rugosa); os coeficientes de variação associados à  $R_{RASGAMENTO}$  eram de 1,8% para a geomembrana lisa e de 3,1% para a geomembrana rugosa.

### 13.5 - Determinação da resistência das geomembranas a soluções ácidas e alcalinas

#### 13.5.1 - Descrição experimental

As geomembranas foram imersas numa solução ácida (ácido sulfúrico, 0,5 mol.L<sup>-1</sup>) e numa solução alcalina (hidróxido de sódio, 0,5 mol.L<sup>-1</sup>) durante 28 dias à temperatura de 90 °C (as geomembranas foram imersas nas mesmas condições que as georredes - Quadro 12.6). Após a imersão, os provetes foram lavados com água desionizada (para remover eventuais restos das soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio) e foram secos durante (pelo menos) 7 dias ao abrigo da luz. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-deformação e de rasgamento.

Os ensaios de imersão foram realizados no banho termostático *GFL 1003* (descrição do equipamento no ponto 6.2.1). As características dos reagentes usados para a preparação das soluções de imersão podem também ser encontradas no ponto 6.2.1.

**13.5.2 - Resultados obtidos**

Os parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, determinados antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio, encontram-se resumidos no Quadro 13.7; os parâmetros mecânicos determinados para a geomembrana rugosa são apresentados no Quadro 13.8.

Quadro 13.7 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto           | 22,5<br>(1,5%)                 | 18,2<br>(7,9%)               | 20,7<br>(5,2%)               | 490<br>(34%)               | 225<br>(2,6%) | 352<br>(1,8%)                  |
| Meio ácido        | 20,5<br>(0,9%)                 | 16,8<br>(6,0%)               | 22,1<br>(5,2%)               | 422<br>(50%)               | 178<br>(6,4%) | 335<br>(1,1%)                  |
| Meio alcalino     | 20,0<br>(2,2%)                 | 16,5<br>(8,7%)               | 23,6<br>(4,5%)               | 490<br>(41%)               | 165<br>(6,5%) | 333<br>(2,5%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 13.8 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após as imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio.

| Ensaio de imersão | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto           | 21,1<br>(1,7%)                 | 21,2<br>(9,4%)               | 21,0<br>(2,5%)               | 662<br>(14%)               | 191<br>(3,6%) | 275<br>(3,1%)                  |
| Meio ácido        | 19,5<br>(1,3%)                 | 20,0<br>(11%)                | 24,4<br>(2,8%)               | 733<br>(11%)               | 151<br>(4,0%) | 270<br>(3,6%)                  |
| Meio alcalino     | 19,4<br>(1,2%)                 | 18,8<br>(16%)                | 23,5<br>(6,3%)               | 598<br>(42%)               | 148<br>(5,2%) | 264<br>(4,9%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A T<sub>CEDENCIA</sub> das geomembranas sofreu uma pequena diminuição após as imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio: a geomembrana lisa apresentava T<sub>CEDENCIA</sub> residuais de 91,1% e de 88,9% no fim das imersões em meio ácido e em meio alcalino, respectivamente. Por sua vez, a geomembrana rugosa possuía uma T<sub>CEDENCIA</sub> residual de 92,4% depois da imersão em ácido sulfúrico e uma T<sub>CEDENCIA</sub> residual de 91,9% no fim da imersão em hidróxido de sódio.

A D<sub>CEDENCIA</sub> das geomembranas aumentou ligeiramente após a imersão nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio: na geomembrana lisa, aumento de 20,7% para 22,1% (depois da imersão em meio ácido) e para 23,6% (no final da imersão em meio alcalino); na geomembrana rugosa, aumento de 21,0% para 24,4% devido à imersão em meio ácido e para 23,5% após a imersão em meio alcalino.

Tal como a T<sub>CEDENCIA</sub>, a T<sub>ROTURA</sub> das geomembranas também diminuiu depois das imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio. De facto, a geomembrana lisa possuía T<sub>ROTURA</sub> residuais de 92,3% e de 90,7% após as imersões em meio ácido e em meio alcalino, respectivamente. Por sua vez, a geomembrana rugosa apresentava uma T<sub>ROTURA</sub> residual de 94,3% no final da imersão em meio ácido e uma T<sub>ROTURA</sub> residual de 88,7% depois da imersão em meio alcalino.

O MD das geomembranas diminuiu em consequência das imersões nas soluções de ácido sulfúrico e de hidróxido de sódio. Deste modo, as imersões em meio ácido e em meio alcalino provocaram uma diminuição da rigidez inicial dos materiais.

As imersões em meio ácido e em meio alcalino não provocaram grandes alterações na  $R_{\text{RASGAMENTO}}$  das geomembranas. De facto, a geomembrana lisa apresentava resistências residuais de 95,2% e 94,6%, depois das imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio, respectivamente. A geomembrana rugosa possuía resistências residuais de 98,2% (meio ácido) e de 96,0% (meio alcalino).

De um modo geral, as geomembranas evidenciaram uma boa resistência à degradação sob condições ácidas e alcalinas fortes. No entanto, e dadas as possíveis consequências para o ambiente causadas por uma falha prematura das geomembranas, poderá ser relevante expor os materiais sob condições ácidas e alcalinas (idênticas ou até mais fortes) durante um maior período de tempo.

### 13.6 - Determinação da resistência das geomembranas à termo-oxidação

#### 13.6.1 - Descrição experimental

As geomembranas foram expostas, durante 28 dias, a 100 °C num forno (*Heraeus Instruments T6120*, descrição do equipamento no ponto 7.2) com uma atmosfera normal de oxigénio e sem circulação forçada de ar. A Figura 13.7 ilustra os provetes das geomembranas colocados no interior do forno.



Figura 13.7 - Geomembranas expostas à termo-oxidação.

Após exposição à termo-oxidação, os provetes das geomembranas foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz durante, pelo menos, 24 horas. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-deformação e a ensaios de rasgamento.

#### 13.6.2 - Resultados obtidos

O Quadro 13.9 resume os valores médios da  $T_{\text{CEDÊNCIA}}$ , da  $T_{\text{ROTURA}}$ , da  $D_{\text{CEDÊNCIA}}$ , da  $D_{\text{ROTURA}}$ , do MD e da  $R_{\text{RASGAMENTO}}$  da geomembrana lisa, determinados antes e após a exposição à termo-oxidação (método do forno). Os parâmetros mecânicos obtidos para a geomembrana rugosa, antes e depois dos 28 dias de exposição a 100 °C, são apresentados no Quadro 13.10.

Quadro 13.9 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|---------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto | 22,5<br>(1,5%)                 | 18,2<br>(7,9%)               | 20,7<br>(5,2%)               | 490<br>(34%)               | 225<br>(2,6%) | 352<br>(1,8%)                  |
| 28 Dias | 22,5<br>(1,3%)                 | 17,4<br>(1,8%)               | 23,9<br>(3,4%)               | 312<br>(44%)               | 211<br>(2,7%) | 362<br>(1,0%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 13.10 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após 28 dias de termo-oxidação pelo método do forno.

| Tempo   | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|---------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto | 21,1<br>(1,7%)                 | 21,2<br>(9,4%)               | 21,0<br>(2,5%)               | 662<br>(14%)               | 191<br>(3,6%) | 275<br>(3,1%)                  |
| 28 Dias | 22,1<br>(1,7%)                 | 20,4<br>(5,8%)               | 24,1<br>(5,4%)               | 678<br>(12%)               | 191<br>(5,5%) | 283<br>(2,2%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A T<sub>CEDENCIA</sub> e a T<sub>ROTURA</sub> das geomembranas não sofreram alterações muito significativas depois dos 28 dias de exposição a 100 °C (T<sub>CEDENCIA</sub> e T<sub>ROTURA</sub> residuais superiores a 95%). Por sua vez, a D<sub>CEDENCIA</sub> das geomembranas aumentou ligeiramente após os ensaios de termo-oxidação (aumento de 20,7% para 23,9% na geomembrana lisa e aumento de 21,0% para 24,1% na geomembrana rugosa).

O MD das geomembranas não se alterou significativamente no fim dos 28 dias de exposição a 100 °C (apenas uma ligeira diminuição do MD da geomembrana lisa). A exposição à termo-oxidação também não provocou grandes alterações na R<sub>RASGAMENTO</sub> das geomembranas (resistências residuais superiores a 100%).

De um modo geral, as geomembranas de PEAD apresentaram uma boa resistência à termo-oxidação. No entanto, e para obter previsões com maior segurança acerca da resistência das geomembranas à oxidação induzida pela temperatura, poderá ser importante expor os materiais à temperatura de 100 °C durante um maior período de tempo e/ou realizar ensaios de termo-oxidação através do novo método (mais drástico que o método do forno; descrição do novo método no Capítulo 8).

### 13.7 - Determinação da resistência das geomembranas aos agentes climáticos artificiais

#### 13.7.1 - Descrição experimental

As geomembranas foram expostas aos agentes climáticos artificiais no simulador laboratorial QUV (marca *Q-Panel Lab Products*, modelo *QUV/spray*; a descrição do equipamento pode ser encontrada no ponto 9.2). As geomembranas foram expostas durante 362 horas (aproximadamente 15 dias) a um ciclo climático formado por um passo de exposição à radiação UV (5 horas a 50 °C) e por um passo de chuva (10 minutos, fluxo de 5 L.min<sup>-1</sup>, diminuição brusca da temperatura dos 50 °C para cerca de 24 °C) (as características do ciclo climático podem ser encontradas no Quadro 9.56). A Figura 13.8 ilustra os provetes das geomembranas expostos no QUV.



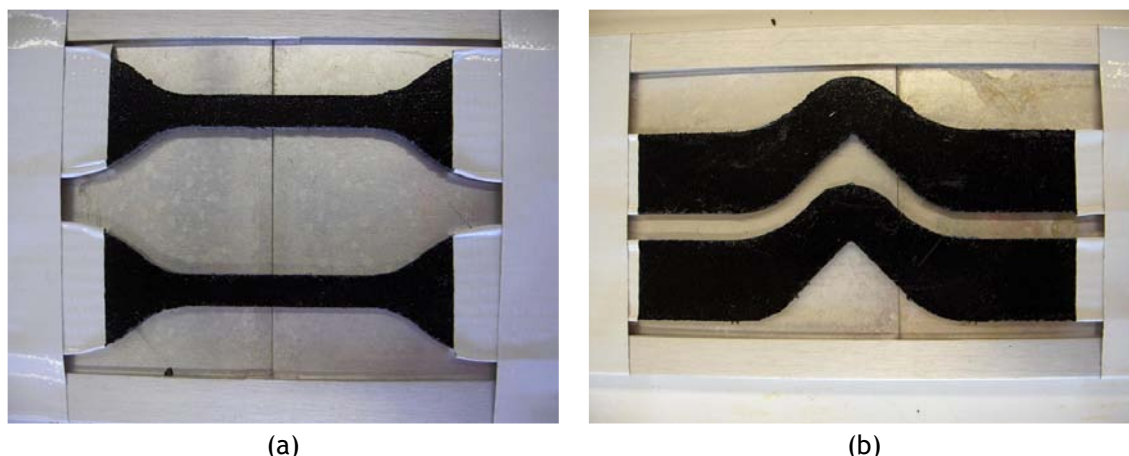


Figura 13.8 - Provetes das geomembranas expostos no QUV: (a) provetes para ensaios de tracção-deformação (ASTM D638); (b) provetes para ensaios de rasgamento (ASTM D1004). (as zonas de fixação dos provetes nos ensaios mecânicos foram protegidas dos agentes climáticos através de uma fita adesiva branca com elevada resistência à radiação UV).

A irradiância durante o passo de exposição à radiação UV foi de  $0,68 \text{ W.m}^{-2}$  aos 340 nm. A radiação incidente total durante as 362 horas de ensaio foi de  $50 \text{ MJ.m}^{-2}$  entre os 290 nm e os 400 nm (valor de radiação incidente total definido na norma NP EN 12224) (radiação incidente total de  $0,86 \text{ MJ.m}^{-2}$  a 340 nm). Os provetes das geomembranas foram expostos a cerca de 70 ciclos climáticos durante as 362 horas totais do ensaio (cada ciclo possui a duração de 5 horas e 10 minutos).

Após a exposição aos agentes climáticos simulados no QUV, os provetes das geomembranas foram armazenados em local seco e ao abrigo da luz durante um período mínimo de 7 dias. Em seguida, os provetes foram sujeitos a ensaios de tracção-deformação e de rasgamento.

### 13.7.2 - Resultados obtidos

Os parâmetros mecânicos das geomembranas, obtidos antes e após a exposição no QUV, podem ser encontrados no Quadro 13.11 (geomembrana lisa) e no Quadro 13.12 (geomembrana rugosa).

Quadro 13.11 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após a exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.

| Tempo     | $T_{\text{CEDÊNCIA}}$<br>(MPa) | $T_{\text{ROTURA}}$<br>(MPa) | $D_{\text{CEDÊNCIA}}$<br>(%) | $D_{\text{ROTURA}}$<br>(%) | MD<br>(MPa)   | $R_{\text{RASGAMENTO}}$<br>(N) |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto   | 22,5<br>(1,5%)                 | 18,2<br>(7,9%)               | 20,7<br>(5,2%)               | 490<br>(34%)               | 225<br>(2,6%) | 352<br>(1,8%)                  |
| 362 Horas | 21,6<br>(1,0%)                 | 17,8<br>(4,8%)               | 21,3<br>(4,8%)               | 551<br>(15%)               | 207<br>(3,3%) | 348<br>(3,7%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A  $T_{\text{CEDÊNCIA}}$  e a  $T_{\text{ROTURA}}$  das geomembranas não sofreram alterações muito relevantes após a exposição aos agentes climáticos simulados no QUV ( $T_{\text{CEDÊNCIA}}$  e  $T_{\text{ROTURA}}$  residuais superiores a 96%). A  $D_{\text{CEDÊNCIA}}$  das geomembranas também não se alterou de modo relevante depois da exposição no QUV. Por sua vez, o MD das geomembranas diminuiu ligeiramente (a exposição no QUV provocou uma redução da rigidez dos materiais). A  $R_{\text{RASGAMENTO}}$  das geomembranas manteve-se praticamente inalterada no fim da exposição aos agentes climáticos artificiais.

Quadro 13.12 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após a exposição aos agentes climáticos simulados no QUV.

| Tempo     | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto   | 21,1<br>(1,7%)                 | 21,2<br>(9,4%)               | 21,0<br>(2,5%)               | 662<br>(14%)               | 191<br>(3,6%) | 275<br>(3,1%)                  |
| 362 Horas | 21,2<br>(1,5%)                 | 21,8<br>(7,4%)               | 22,2<br>(2,7%)               | 724<br>(10%)               | 180<br>(4,5%) | 274<br>(2,4%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

As geomembranas de PEAD apresentaram uma boa resistência ao envelhecimento climático sob condições artificiais. No entanto, o aumento do tempo de exposição (aumento da radiação incidente total) aos agentes climáticos simulados no QUV (principalmente à radiação UV) poderá provocar o aparecimento de danos nos materiais. Assim, poderá ser importante expor as geomembranas no QUV durante um maior período de tempo (deste modo, será possível avaliar o quanto as geomembranas são resistentes aos agentes climáticos simulados no QUV). Em seguida, procede-se à avaliação da resistência das geomembranas ao envelhecimento climático sob condições reais.

### 13.8 - Determinação da resistência das geomembranas aos agentes climáticos reais

#### 13.8.1 - Descrição experimental

As geomembranas foram expostas aos agentes climáticos reais à latitude de 41°13' N e à longitude de 8°39' W (elevação de 49 metros acima do nível do mar) (mesmo local de exposição dos geotêxteis e das georredes). As geomembranas foram colocadas em suportes metálicos orientados para Sul com uma inclinação de 30° (os provetes foram atados aos suportes com fio metálico). As zonas por onde os provetes são fixados nos ensaios mecânicos foram protegidas da acção dos agentes climáticos reais através de uma fita adesiva branca com alta resistência à radiação UV. A Figura 13.9 ilustra as geomembranas expostas aos agentes climáticos reais.



Figura 13.9 - Geomembranas expostas aos agentes climáticos reais: (a) vista geral de vários provetes expostos (b) pormenor de alguns provetes expostos (para ensaios de tracção-deformação).

As geomembranas foram expostas aos agentes climatéricos reais durante um período máximo de 12 meses (entre Outubro de 2006 e Outubro de 2007), ao longo do qual foram periodicamente (de 3 em 3 meses) recolhidos provetes para caracterização mecânica (ensaios de tracção-deformação e de rasgamento).

### 13.8.2 - Caracterização meteorológica do local de exposição aos agentes climatéricos

Os principais parâmetros meteorológicos do local de exposição (radiação incidente, temperatura do ar, precipitação, humidade relativa e velocidade do vento) foram continuamente registados durante a exposição das geomembranas aos agentes climatéricos reais. A caracterização climática do local de exposição entre Outubro de 2006 e Outubro de 2007 pode ser encontrada no Capítulo 10 (Figuras 10.5 a 10.9: figuras com informações meteorológicas entre Novembro de 2004 e Novembro de 2007).

A temperatura do ar média mensal variou entre 9,9 °C (Janeiro de 2007) e 24,2 °C (Agosto de 2007); o dia mais frio foi 26 de Janeiro de 2007 (média diária de 4,7 °C) e o dia mais quente foi 3 de Agosto de 2007 (média diária de 31,1 °C). A radiação solar incidente foi mínima em Janeiro de 2007 (196,9 MJ.m<sup>-2</sup> de radiação incidente total) e máxima em Junho de 2007 (871,7 MJ.m<sup>-2</sup> de radiação incidente total).

A humidade relativa média mensal variou entre 72,6% (Dezembro de 2006) e 83,5% (Maio de 2007). A precipitação total mensal foi máxima em Outubro de 2006 (precipitação total de 243 mm) e mínima em Outubro de 2007 (precipitação total de 10 mm). O dia mais chuvoso foi 26 de Novembro de 2006 (precipitação total de 50 mm).

A velocidade do vento média mensal foi maior em Outubro de 2006 (média mensal de 14,5 Km.h<sup>-1</sup>). O dia mais ventoso foi 25 de Novembro de 2006 (média diária de 30,2 Km.h<sup>-1</sup>). A velocidade máxima atingida pelo vento foi registada a 14 de Fevereiro de 2007 (velocidade instantânea de 75,6 Km.h<sup>-1</sup>).

O Quadro 13.13 resume, para os diferentes tempos de exposição, os valores totais da radiação solar incidente e da precipitação, bem como os valores médios da temperatura, da humidade relativa e da velocidade do vento a que as geomembranas estiveram sujeitas durante a exposição aos agentes climatéricos reais.

Quadro 13.13 - Temperatura média do ar, radiação solar incidente total, precipitação total, humidade relativa média e velocidade do vento média a que as geomembranas estiveram sujeitas durante os diferentes tempos de exposição aos agentes climatéricos reais.

| Tempo de exposição (meses) | Temperatura média do ar (°C) | Radiação solar incidente total* (MJ.m <sup>-2</sup> ) | Precipitação total (mm) | Humidade relativa média (%) | Velocidade do vento média (Km.h <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|------------------------------|---|-------------------------|-----------------------------|---|
| 3                          | 13,8                         | 468   | 576                     | 75,9                        | 13,9  |
| 6                          | 13,6                         | 1344  | 815                     | 76,7                        | 12,1  |
| 9                          | 15,9                         | 3281  | 1021                    | 78,3                        | 10,8  |
| 12                         | 17,8                         | 5343  | 1094                    | 77,5                        | 10,0  |

(\*entre os 300 nm e os 3000 nm; sem os dados de radiação de Outubro de 2006)

**13.8.3 - Resultados obtidos**

Os parâmetros mecânicos das geomembranas, determinados antes e após os diferentes intervalos de exposição aos agentes climáticos reais, encontram-se resumidos nos Quadros 13.14 (geomembrana lisa) e 13.15 (geomembrana rugosa).

Quadro 13.14 - Parâmetros mecânicos da geomembrana lisa, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto  | 22,5<br>(1,5%)                 | 18,2<br>(7,9%)               | 20,7<br>(5,2%)               | 490<br>(34%)               | 225<br>(2,6%) | 352<br>(1,8%)                  |
| 3 Meses  | 22,0<br>(1,5%)                 | 17,8<br>(11%)                | 24,5<br>(1,4%)               | 472<br>(44%)               | 166<br>(5,6%) | 350<br>(2,1%)                  |
| 6 Meses  | 20,4<br>(1,1%)                 | 17,4<br>(6,3%)               | 23,6<br>(3,8%)               | 564<br>(18%)               | 151<br>(2,0%) | 330<br>(2,4%)                  |
| 9 Meses  | 19,6<br>(1,6%)                 | 17,5<br>(7,7%)               | 24,1<br>(2,6%)               | 578<br>(16%)               | 147<br>(3,4%) | 323<br>(1,6%)                  |
| 12 Meses | 21,2<br>(0,5%)                 | 17,9<br>(11%)                | 21,9<br>(3,0%)               | 528<br>(36%)               | 179<br>(4,6%) | 344<br>(2,0%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

Quadro 13.15 - Parâmetros mecânicos da geomembrana rugosa, antes e após os vários tempos de exposição aos agentes climáticos reais.

| Tempo    | T <sub>CEDENCIA</sub><br>(MPa) | T <sub>ROTURA</sub><br>(MPa) | D <sub>CEDENCIA</sub><br>(%) | D <sub>ROTURA</sub><br>(%) | MD<br>(MPa)   | R <sub>RASGAMENTO</sub><br>(N) |
|----------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
| Intacto  | 21,1<br>(1,7%)                 | 21,2<br>(9,4%)               | 21,0<br>(2,5%)               | 662<br>(14%)               | 191<br>(3,6%) | 275<br>(3,1%)                  |
| 3 Meses  | 20,8<br>(1,9%)                 | 22,2<br>(6,1%)               | 22,2<br>(4,1%)               | 744<br>(8,0%)              | 163<br>(3,8%) | 282<br>(4,3%)                  |
| 6 Meses  | 20,3<br>(2,0%)                 | 20,5<br>(8,2%)               | 21,9<br>(4,9%)               | 705<br>(9,1%)              | 167<br>(5,3%) | 269<br>(2,5%)                  |
| 9 Meses  | 19,3<br>(1,6%)                 | 22,7<br>(5,8%)               | 22,1<br>(5,5%)               | 828<br>(7,9%)              | 155<br>(6,1%) | 281<br>(6,6%)                  |
| 12 Meses | 20,6<br>(1,1%)                 | 21,6<br>(12%)                | 20,7<br>(4,7%)               | 735<br>(23%)               | 184<br>(4,3%) | 281<br>(5,0%)                  |

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A T<sub>CEDENCIA</sub> e a T<sub>ROTURA</sub> das geomembranas não sofreram grandes alterações após os diferentes tempos de exposição aos agentes climáticos reais. Ao fim de 12 meses de exposição, a geomembrana lisa possuía uma T<sub>CEDENCIA</sub> residual de 94,2% e uma T<sub>ROTURA</sub> residual de 98,4%; por sua vez, a geomembrana rugosa apresentava uma T<sub>CEDENCIA</sub> residual de 97,6% e uma T<sub>ROTURA</sub> residual de 102%.

A D<sub>CEDENCIA</sub> das geomembranas sofreu algumas variações (sem grande significado) durante a exposição aos agentes climáticos reais. Por sua vez, o MD diminuiu com a exposição aos agentes climáticos reais (redução da rigidez). Por fim, ocorreram algumas variações (também sem grande significado) na R<sub>RASGAMENTO</sub> dos materiais. Após 12 meses de exposição, a geomembrana lisa tinha uma R<sub>RASGAMENTO</sub> residual de 97,7%, enquanto que a geomembrana rugosa possuía uma R<sub>RASGAMENTO</sub> residual de 102%.

As geomembranas apresentaram uma boa resistência a uma exposição relativamente prolongada (12 meses) aos agentes climáticos reais. No entanto, e para avaliar o quanto as geomembranas podem ser resistentes aos agentes climáticos reais, poderá ser importante expor os materiais ao ar livre durante um maior período de tempo ou expor os materiais noutra local (com um perfil climatológico mais adverso).

### **13.9 - Considerações finais**

Neste capítulo, procedeu-se à avaliação da resistência de duas geomembranas (ambas de PEAD) a vários agentes de degradação químicos: imersão em meio ácido (ácido sulfúrico) e em meio alcalino (hidróxido de sódio), termo-oxidação (pelo método do forno) e exposição aos agentes climáticos, tanto em condições reais, como em condições simuladas laboratorialmente.

De um modo geral, as geomembranas apresentaram uma resistência bastante elevada aos diferentes agentes de degradação químicos (dentro das condições experimentais usadas). No entanto, e tendo em conta que é necessário que as geomembranas possuam uma resistência muito elevada aos vários agentes de degradação (em algumas aplicações, a falha prematura destes materiais poderá provocar danos ambientais muito graves), poderá ser relevante expor os materiais sob condições mais severas que as utilizadas. Desse modo, será possível determinar com mais segurança qual a resistência das geomembranas aos diversos agentes de degradação.

Por fim, é de notar que seria importante ter geomembranas, com diferentes composições químicas, expressamente fabricadas para este tipo de estudos. No entanto, e na impossibilidade de se usarem materiais com composições químicas diferentes e conhecidas, optou-se por efectuar este estudo (de uma forma um pouco exploratória) para materiais existentes no mercado.



## Considerações finais

A exposição prolongada a alguns agentes de degradação físicos e/ou químicos (principalmente, aos agentes climatéricos e a temperaturas elevadas, na presença de oxigénio) pode provocar alterações significativas nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos. Assim, a incorporação de aditivos químicos (tais como, o C944 ou o negro de carbono) é indispensável para prolongar o tempo de vida útil dos materiais.

Em seguida, destacam-se as principais conclusões obtidas neste trabalho e apresentam-se algumas propostas para a continuação da investigação.

### Resistência dos geossintéticos a líquidos

De um modo geral, os geotêxteis de PP apresentaram uma boa resistência à imersão em líquidos. De facto, e com a excepção das imersões em ácido nítrico, os vários ensaios de imersão realizados não provocaram grandes danos nos materiais. Por sua vez, as georredes e as geomembranas de PEAD não sofreram danos muito significativos durante as imersões em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio.

Apesar de não causar danos imediatos nos geossintéticos, a imersão em líquidos poderá provocar a extracção ou consumo dos estabilizantes presentes nos materiais, desprotegendo-os contra agentes de degradação futuros. Além disso, poderá contaminar os geossintéticos com espécies químicas (por exemplo, catiões metálicos) que, posteriormente, podem originar uma diminuição da resistência dos materiais a outros agentes de degradação (o processo de termo-oxidação dos geotêxteis de PP pode, por exemplo, ser acelerado pela presença de alguns catiões metálicos).

Dado que as imersões em ácido nítrico provocaram danos significativos nos geotêxteis de PP, poderá ser importante estudar, com mais detalhe, o efeito deste ácido na durabilidade dos geossintéticos.

Uma vez que os geossintéticos podem estar em contacto com líquidos em muitas aplicações (como nos aterros de resíduos ou nas estruturas de protecção costeira), poderá ser interessante avaliar, *in situ*, a resistência dos materiais aos lixiviados (imersão numa bacia de lixiviados) e à água do mar. No caso da água do mar, poderá também ser estudado o efeito das marés (ciclos de seco-molhado); nesse estudo, os materiais estariam simultaneamente expostos à acção dos agentes climatéricos.

### Resistência dos geossintéticos à termo-oxidação - método do forno

Os geotêxteis de PP não estabilizados apresentaram uma má resistência à termo-oxidação (materiais praticamente destruídos após 9 dias de exposição a 110 °C). A incorporação de C944 resultou num aumento considerável da resistência dos geotêxteis de PP à termo-oxidação. Depois de 304 dias de exposição a 110 °C, o geotêxtil B2-280 (com 0,2% de C944) ainda possuía uma resistência à tracção residual superior a 50%.

A exposição a 110 °C (método do forno) permitiu distinguir, em termos de resistência à oxidação, os geotêxteis estabilizados dos não estabilizados. No entanto, em 56 dias de exposição, foi incapaz de distinguir os materiais com diferentes tipos de estabilização (a exposição durante um maior período de tempo poderá permitir a distinção destes materiais).

A velocidade de degradação dos geotêxteis de PP (durante os ensaios de termo-oxidação) foi muito dependente da temperatura (tanto maior, quanto maior a temperatura). De facto, cada aumento de 10 °C na temperatura provocou a duplicação da velocidade do processo de termo-oxidação.

O modelo de Arrhenius permitiu estimar que, a 20 °C, serão necessários aproximadamente 42 anos para a degradação completa do geotêxtil B0-280 (à mesma temperatura, serão necessários cerca de 39 anos para o material apresentar uma resistência à tracção residual de 50%).

Assim, e tendo em conta que, ao fim de 304 dias a 110 °C, a resistência residual do geotêxtil B2-280 ainda era superior a 50% (à mesma temperatura, o geotêxtil B0-280 estava praticamente destruído depois de 9 dias de exposição), é possível prever que, à temperatura ambiente, serão necessárias centenas de anos para a degradação total do geotêxtil B2-280. Deste modo, a incorporação de uma pequena quantidade de C944 (0,2%) praticamente garante que a degradação dos geotêxteis causada apenas pela termo-oxidação não será um problema durante o tempo de vida da estrutura onde os materiais estão inseridos.

No entanto, é muito importante ter em conta que as previsões efectuadas apenas estão a considerar o efeito da oxidação induzida pela temperatura (além disso, assumem que o mecanismo de oxidação não sofre alterações com a variação da temperatura). Dado que, em situações reais, os geotêxteis estão expostos a outros agentes de degradação (para além da termo-oxidação), o tempo de vida útil dos materiais será inferior aos tempos estimados pelo modelo de Arrhenius.

A imersão em ácido sulfúrico (pH 1, 150 dias à temperatura ambiente) provocou uma diminuição da resistência à termo-oxidação do geotêxtil B2-280. Desta forma, dois agentes que, apenas por si, não causaram danos significativos no material podem, em conjunto, provocar alguma degradação. Pelo contrário, as imersões em água, ácido nítrico e hidróxido de sódio não originaram uma diminuição da resistência à termo-oxidação do geotêxtil B2-280.

A presença dos catiões metálicos cobre, ferro e zinco provocou uma redução drástica da resistência à termo-oxidação do geotêxtil B2-280; alguns catiões metálicos podem actuar como catalisadores do processo de oxidação dos geotêxteis de PP. Deste modo, poderá ser interessante estudar o efeito de outros catiões metálicos (tais como, manganésio, cobalto ou níquel) na resistência à termo-oxidação dos geotêxteis de PP (e mesmo de outros geossintéticos).

Na presença do catião cobre, foram necessários 14 dias para a degradação total do geotêxtil B2-280 a 110 °C (tempo idêntico ao necessário para a degradação completa do geotêxtil B0-280 na ausência de qualquer catião metálico - 9 dias). Assim, a presença do aditivo C944 não retardou a oxidação do geotêxtil B2-280 catalisada pelo catião cobre.



O efeito da exposição conjunta a dois ou mais agentes de degradação pode não ser igual à soma dos efeitos individuais de cada um desses agentes isolados. De facto, podem ocorrer sinergismos entre os vários agentes de degradação (a diminuição da resistência à termo-oxidação do geotêxtil B2-280 na presença dos catiões metálicos cobre, ferro e zinco é um exemplo disso). Por isso, é importante expor os geossintéticos a vários agentes de degradação em simultâneo (desta forma, a degradação global sofrida pelos materiais poderá ser estimada com maior exactidão).

De um modo geral, as georredes de PEAD apresentaram uma boa resistência à termo-oxidação. De facto, mesmo a georrede B0 (não estabilizada) não possuía danos significativos ao fim de 56 dias de exposição a 100 °C. Assim, o método do forno não permitiu distinguir as 5 georredes com diferentes composições químicas (o aumento do tempo de exposição poderá permitir distinguir os materiais).

Por fim, as geomembranas de PEAD também apresentaram uma boa resistência à termo-oxidação.

### **Resistência dos geossintéticos à termo-oxidação - novo método**

Neste trabalho, foram desenvolvidos um novo equipamento (um protótipo) e método para avaliar a resistência dos geossintéticos à termo-oxidação. Neste método, os geossintéticos são imersos, a 80 °C, numa solução de peróxido de hidrogénio. Por acção da temperatura, o peróxido de hidrogénio é decomposto em água e em oxigénio (o equipamento permite uma pressão máxima de 50 bar).

O geotêxtil B0-500 (sem aditivos) foi totalmente destruído durante os ensaios pelo novo método (tal como no método do forno). A degradação sofrida pelo geotêxtil B4-500 (0,4% de C944) foi menor do que a degradação ocorrida no geotêxtil B2-500 (0,2% de C944). Assim, a resistência dos materiais à termo-oxidação aumentou pela incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP.

O novo método permitiu distinguir, em termos de resistência à oxidação, e num intervalo de tempo relativamente pequeno (14 dias), três geotêxteis de PP com diferentes estabilizações (o método do forno não permitiu distinguir, num curto intervalo de tempo, os geotêxteis B2-500 e B4-500).

O novo método permitiu, também, distinguir, em termos de resistência à oxidação, as georredes B0 e B2 (o que mostrou a importância do aditivo T783 na protecção das georredes de PEAD contra os efeitos da termo-oxidação). Deste modo, e mais uma vez, o novo método permitiu distinguir, num pequeno intervalo de tempo, materiais que não foram distinguidos pelo método do forno. Assim, o novo método é mais agressivo do que o método do forno, provocando maior degradação num menor período de tempo.

O novo método é simples, barato, fácil de executar e permite obter resultados num curto espaço de tempo. Além disso, permite a distinção de materiais (em termos de resistência à oxidação) que não foram distinguidos pelo método do forno. No futuro, é importante testar mais geossintéticos usando este método (seria interessante testar simultaneamente os mesmos materiais pelo método do forno, de modo a poder comparar os resultados obtidos).

### **Resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos - exposição em laboratório**

A resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos simulados no QUV (radiação UV, chuva e humidade/orvalho) variou significativamente de acordo com a composição química dos materiais. Os geotêxteis não estabilizados foram destruídos em quase todos os ensaios (excepção nos ensaios sem exposição à radiação UV).

A degradação dos geotêxteis de PP foi muito retardada pela incorporação de C944 nos materiais. A degradação ocorrida nos geotêxteis com 0,2% de C944 foi maior do que a degradação sofrida pelos geotêxteis com 0,4% de C944. Assim, a incorporação de uma maior quantidade de C944 nas fibras de PP resultou numa melhor protecção dos geotêxteis contra os agentes climáticos (principalmente contra a radiação UV, o principal responsável pela degradação dos materiais).

A presença de negro de carbono provocou um aumento significativo da resistência dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos simulados em laboratório. De facto, os geotêxteis pretos apresentaram uma resistência muito elevada a quase todos os ensaios climáticos.

A exposição laboratorial à chuva e à humidade não provocou danos significativos nos geotêxteis de PP. A degradação dos materiais ocorreu principalmente devido à exposição à radiação UV e foi tanto maior quanto maior a radiação incidente total e o tempo de exposição. O aumento da temperatura e da irradiância do passo de exposição à radiação UV também causaram um aumento da degradação sofrida pelos geotêxteis de PP.

De um modo geral, os danos sofridos pelos geotêxteis com 280 g.m<sup>-2</sup> foram superiores aos ocorridos nos geotêxteis com 500 g.m<sup>-2</sup> (comparando materiais com a mesma composição química). Assim, os materiais com maior massa por unidade de área (mais espessos) apresentam uma maior resistência à acção dos agentes climáticos (a exposição sob condições reais permitiu obter a mesma conclusão).

Ao contrário das imersões à temperatura ambiente, as imersões à temperatura de 90 °C (em água, em ácido sulfúrico e em hidróxido de sódio) provocaram uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos artificiais. Os danos causados pela exposição sucessiva do material a dois agentes de degradação (imersão em líquidos e exposição no QUV) foram maiores que a soma dos danos provocados por cada um dos agentes isolados (só por si, a imersão em líquidos não causou danos mecânicos no geotêxtil B2-500). Estes resultados apontam, mais uma vez, para a importância de estudar o efeito combinado de vários agentes de degradação na durabilidade dos geossintéticos.

A presença dos catiões metálicos cádmio, cobre e zinco provocou uma diminuição da resistência do geotêxtil B2-500 aos agentes climáticos simulados no QUV. Por sua vez, a presença do catião ferro não teve nenhum efeito catalisador no processo de foto-degradação dos geotêxteis de PP.

A exposição aos agentes climáticos causou o aparecimento de uma nova banda (centrada a 1720 cm<sup>-1</sup>) nos espectros de infravermelho dos geotêxteis B2-500 e B4-500; esta banda indica a presença de compostos carbonílicos formados no processo de foto-degradação do PP. O aumento da energia da radiação UV incidente provocou um aumento da intensidade da banda a 1720 cm<sup>-1</sup>; este aumento

foi mais significativo (maior degradação) para as fibras do geotêxtil B2-500 do que para as fibras do geotêxtil B4-500 (o que está de acordo com os resultados mecânicos obtidos).

A exposição aos agentes climáticos simulados no QUV provocou uma diminuição do teor de C944 existente no geotêxtil B4-500. Assim, o aditivo foi consumido e/ou transformado noutros compostos durante o desempenho das suas funções protectoras.

A georrede B0 (não estabilizada) apresentou maior resistência aos agentes climáticos simulados no QUV do que os geotêxteis de PP não estabilizados. Assim, e na ausência de aditivos, os materiais de PEAD são mais resistentes à foto-degradação do que os materiais de PP.

A foto-degradação das georredes de PEAD foi retardada pela incorporação do aditivo químico T783; o negro de carbono e o pigmento verde (uma ftalocianina de cobre) também causaram um aumento da resistência das georredes de PEAD aos agentes climáticos simulados em laboratório (a presença do negro de carbono resultou numa maior protecção do que a presença do pigmento verde).

#### **Resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos - exposição sob condições reais**

A exposição prolongada dos geotêxteis de PP aos agentes climáticos reais provocou alterações nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais. As alterações ocorridas foram distintas para os vários geotêxteis, dependendo da sua composição química e das suas características físicas (massa por unidade de área e/ou espessura).

Os geotêxteis não estabilizados (B0-280 e B0-500) foram totalmente destruídos durante a exposição ao ar livre (destruição completa após 21 e 24 meses de exposição, respectivamente). Por sua vez, os geotêxteis estabilizados não apresentavam danos visíveis depois de 36 meses de exposição (contudo, ocorreram alterações significativas nas suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas).

A presença de C944 nas fibras de PP provocou um grande aumento da resistência dos geotêxteis aos agentes climáticos reais. A resistência dos materiais com 0,4% de C944 foi superior à dos materiais com 0,2% de C944 (comparando geotêxteis com massas por unidade de área semelhantes e expostos durante o mesmo intervalo de tempo). A incorporação de negro de carbono nas fibras de PP resultou numa protecção extra dos geotêxteis de PP contra a acção dos agentes climáticos reais.

De um modo geral, e para materiais com a mesma composição química, os geotêxteis com  $500 \text{ g.m}^{-2}$  apresentaram maior resistência aos agentes climáticos reais do que os geotêxteis com  $280 \text{ g.m}^{-2}$ , confirmando as previsões obtidas no QUV.

A variação da massa por unidade de área e espessura dos geotêxteis expostos ao ar livre dependeu de dois aspectos: (1) da libertação de fibras degradadas (o que causou uma diminuição da massa por unidade de área e da espessura) e (2) da acumulação de sujidade nos materiais (o que provocou um “falso” aumento dos valores destas propriedades).

A exposição prolongada ao ar livre originou alterações no comportamento hidráulico dos geotêxteis: as velocidades de escoamento do geotêxtil B0-500 (não estabilizado) aumentaram (devido à elevada

degradação ocorrida neste material, com perda de massa polimérica); relativamente aos geotêxteis estabilizados (com 500 g.m<sup>-2</sup>), as velocidades de escoamento diminuíram (a acumulação de poeiras e pequenas partículas de lixo causou o preenchimento e/ou colmatação dos espaços livres existentes entre as fibras destes materiais, o que dificultou a passagem da água).

A quantidade de C944 existente nos geotêxteis B2-500 e B4-500 diminuiu com o aumento do tempo de exposição aos agentes climáticos reais. Assim, a exposição ao ar livre causou o consumo e/ou a perda de C944; no geotêxtil B4-500, a diminuição da quantidade de C944 obedeceu a uma cinética de primeira ordem (decaimento exponencial no tempo).

Não foi possível obter uma correlação única e universal entre o envelhecimento dos geotêxteis ao ar livre e no QUV (a obtenção de correlações deste tipo é uma tarefa muito complicada, se não mesmo impossível). No entanto, foram obtidas algumas correlações individuais entre a degradação sofrida por alguns materiais sob condições reais e em laboratório.

As georredes de PEAD apresentaram uma boa resistência aos agentes climáticos reais. Os 24 meses totais de exposição não permitiram distinguir, em termos de resistência aos agentes climáticos, as diferentes georredes (o aumento do tempo de exposição poderá permitir a distinção dos materiais e confirmar, ou não, as previsões obtidas no QUV).

De um modo geral, os 12 meses de exposição aos agentes climáticos reais não provocaram danos muito significativos nas geomembranas de PEAD. No entanto, e dado que estes materiais devem ser muito resistentes à degradação, poderá ser importante expô-los à acção do clima durante um maior período de tempo (de preferência, usando geomembranas com composições químicas conhecidas).

A exposição sob condições reais é o único modo de determinar com total confiança a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos. No entanto, e dado que as exposições ao ar livre são muito demoradas, em alternativa podem ser usados simuladores laboratoriais. Contudo, é importante não esquecer que os materiais podem ter comportamentos distintos ao ar livre e em laboratório.

#### **Resistência dos geossintéticos aos agentes do solo**

De um modo geral, a exposição *in situ* aos agentes de um solo húmido (12 meses de exposição a 5 e a 25 cm de profundidade) não causou grandes danos nos geotêxteis B0-280 e B0-500 (materiais não estabilizados). Assim, os geotêxteis de PP apresentaram uma boa resistência à acção dos agentes do solo. No entanto, e dado ser um ensaio de degradação sob condições reais, poderá ser interessante expor os materiais (e outros geossintéticos) durante um maior período de tempo.

Por último, no futuro, poderá ser interessante estudar outros materiais com diferentes composições químicas (diferentes polímeros e estabilizantes). Deste modo, poderá ser avaliado a contribuição de outros aditivos químicos para o aumento, ou não, da durabilidade dos geossintéticos.

## Bibliografia

- [1] M.L.C. Lopes (1998) “Aplicação de Geossintéticos em Engenharia” Texto de apoio à disciplina “Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [2] W.K. Beckham & W.H. Mills (1935) “Cotton-fabric-reinforced roads” *Engineering News-Record*, vol. 115, n.º 14, pp. 453-455.
- [3] M.J.F.P. Lopes (2004) “Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos” Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [4] R.M. Koerner (1999) “Designing with Geosynthetics” Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 761p.
- [5] T.S. Ingold (1994) “The Geotextiles and Geomembranes Manual” 1<sup>st</sup> Ed., Elsevier Advanced Technology, 610p.
- [6] A. Ram (1997) “Fundamentals of Polymer Engineering” Plenum Press, New York, 237p.
- [7] R.J. Crawford (1998) “Plastics Engineering” 3<sup>rd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 505p.
- [8] D. Reger, S. Goode & E. Mercer (1997) “Química - Princípios e Aplicações” Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1130p. (versão Portuguesa de “Chemistry. Principles and Practice”, Saunders College Publishing, 1993).
- [9] R. Morrison & R. Boyd (1996) “Química Orgânica” 13.<sup>a</sup> Ed., Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1510p. (versão Portuguesa de “Organic Chemistry”, 6<sup>th</sup> Ed., Prentice-Hall, 1992).
- [10] W.H. Brown (1995) “Organic Chemistry” Saunders College Publishing, Philadelphia, 1115p.
- [11] A.L. Rolin (2004) “Long term performance of geotextiles” *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference, Session 4D*, pp. 15-20.
- [12] A.M.M. Baker & J. Mead (1999) “Thermoplastics” Chapter in book “Modern Plastics Handbook”, McGraw-Hill, New York, pp. 1.1-1.92.
- [13] L. Kattas, F. Gastrock, I. Levin & A. Cacciatore (1999) “Plastic Additives” Chapter in book “Modern Plastics Handbook”, McGraw-Hill, New York, pp. 4.1-4.69.
- [14] S. Al-Malaika (1998) “Antioxidants: an overview” Chapter in book “Plastic Additives: An A-Z Reference” Chapman & Hall, London, pp. 55-72.
- [15] J.A. Brydson (1999) “Plastic Materials” 7<sup>th</sup> Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 920p.
- [16] W.S. Sondhelm (2000) “Technical fabric structures - 1. Woven fabrics” Chapter in book “Handbook of Technical Textiles” Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 62-94.

- [17] P.A. Smith (2000) "Technical fabric structures - 3. Nonwoven fabrics" Chapter in book "Handbook of Technical Textiles" Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 130-151.
- [18] S.C. Anand (2000) "Technical fabric structures - 2. Knitted fabrics" Chapter in book "Handbook of Technical Textiles" Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 95-129.
- [19] M.E. Hall (2000) "Finishing of technical textiles" Chapter in book "Handbook of Technical Textiles" Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 152-172.
- [20] M.I.M. Pinto, M.L. Lopes & M.P. Lopes (2007) "Normalização de geossintéticos em Portugal. Marcação CE" *Actas do 2.º Seminário Português Sobre Geossintéticos*, Lisboa, pp. 227-237.
- [21] M. Pinho-Lopes & M.L. Lopes (2009) "A Durabilidade dos Geossintéticos" FEUP Edições, Porto, *em impressão*.
- [22] Página da *Internet* do Instituto Português da Qualidade (<http://www.ipq.pt>).
- [23] Página da *Internet* da Comissão Europeia de Normalização (<http://www.cen.eu>).
- [24] Página da *Internet* da Organização Internacional de Normalização (<http://www.iso.org>).
- [25] Página da *Internet* da "American Society for Testing Materials" (<http://www.astm.org>).
- [26] T.S. Ingold & K.S. Miller (1988) "Geotextiles Handbook" Thomas Telford, London, 152p.
- [27] A.M. Paula, M. Pinho-Lopes & M.L. Lopes (2008) "Combined effect of damage during installation and long-term mechanical behaviour of geosynthetics" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 185).
- [28] R.P.S.X. Silvano (2005) "Solo reforçado com geossintéticos. Estudos dos parâmetros caracterizadores do comportamento" Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- [29] R. Silvano & M.L. Lopes (2006) "Soil/geosynthetic interface characterization - the influence of some aspects of the test procedure" *Geosynthetics - Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam, vol. 4, pp. 1459-1462.
- [30] C.P.F.C. Lopes (2001) "Estudo da interacção solo-geossintético através de ensaios de corte em plano inclinado" Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [31] P. Lopes & M.L. Lopes (2001) "O ensaio de corte em plano inclinado para estudo dos fenómenos de interacção solo-geossintético" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 92, pp. 69-86.
- [32] A.M.P. Gerales (2008) "Caracterização da interacção solo-geossintético e geossintético-geossintético aplicados em taludes rodoviários através de ensaios de corte em plano inclinado" Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Ramos de Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- 
- [33] P.M.R. Baltazar (2009) "Interfaces solo-geossintético em corte em plano inclinado" Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [34] M.A.S.A. Ladeira (1995) "Estudo dos fenómenos da interacção solo-geossintético através de ensaios de arranque" Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [35] M. Ladeira & M.L. Lopes (1995) "O ensaio de arranque para o estudo dos fenómenos de interacção solo-reforço" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 74, pp. 39-49.
- [36] M.L. Lopes & M. Ladeira (1996) "Role of specimen geometry, soil height, and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids" *Geosynthetics International*, vol. 3, n.º 6, pp. 701-719.
- [37] M.J.F.P. Lopes (1998) "Estudo da influência da granulometria do solo e da estrutura de reforço nos mecanismos de interacção solo-geossintético" Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [38] M.L. Lopes & M. Ladeira (1998) "Avaliação do papel das condições de ensaio na definição da resistência ao arranque de reforços" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 82, pp. 5-15.
- [39] M.L. Lopes (1998) "Comportamento ao arranque de reforços danificados" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 83, pp. 27-36.
- [40] M.J. Lopes & M.L. Lopes (1999) "Soil-geosynthetic interaction - influence of soil particle size and geosynthetic structure" *Geosynthetics International*, vol. 6, n.º 4, pp. 261-282.
- [41] R. Silvano, M. Pinho-Lopes, J.C. Marques & M.L. Lopes (2004) "Pull out tests: experimental and numerical results" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 1, pp. 323-326.
- [42] M. Pinho-Lopes, R. Silvano & M.L. Lopes (2006) "Geosynthetic pullout in fine-grained soil: analysis of soil/geosynthetic interface behaviour" *Geosynthetics - Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam, vol. 4, pp. 1455-1458.
- [43] A.M.V. Paula (2003) "Danificação durante a instalação - avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos" Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [44] M.P. Lopes & M.L. Lopes (2003) "Um equipamento para realização de ensaios laboratoriais de danificação durante a instalação de geossintéticos" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 98, pp. 7-24.
- [45] A.M. Paula, M. Pinho-Lopes & M.L. Lopes (2004) "Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos. Influência do material de confinamento" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 102, pp. 71-83.
-

- [46] A.M. Paula, M. Pinho-Lopes e M.L. Lopes (2004) "Damage during installation laboratory test. Influence of the type of granular material" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 2, pp. 603-606.
- [47] M.P. Lopes, M.L. Lopes & M. Paula (2006) "Avaliação da fiabilidade dos ensaios de laboratório na previsão da danificação durante a instalação *in situ* de geossintéticos" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 108, pp. 175-195.
- [48] A.E.S. Pinto (2005) "Aplicação de geossintéticos em linhas-férreas. Estudo laboratorial dos fenómenos de danificação durante a instalação e abrasão nos materiais" Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [49] A. Pinto & M.L. Lopes (2006) "Um equipamento para a realização de ensaios laboratoriais de abrasão de geossintéticos" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 108, pp. 67-77.
- [50] D. Kay, E. Blond & J. Mlynarek (2004) "Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue" *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference*, Session 4D, pp. 1-14.
- [51] C. Maier & T. Calafut (1998) "Polypropylene - The Definitive User's Guide and Databook" *Plastics Design Library*, New York, 432p.
- [52] F. Gugumus (2009) "Light stabilizers" Chapter in book "Plastic Additives Handbook" 6<sup>th</sup> Ed., Carl Hanser Verlag, Munich, pp. 139-424.
- [53] K. Schwarzenbach, B. Gilg, D. Müller, G. Knobloch, J.-R. Pauquet, P. Rota-Graziosi, A. Schmitter, J. Zingg & E. Kramer (2009) "Antioxidants" Chapter in book "Plastic Additives Handbook" 6<sup>th</sup> Ed., Carl Hanser Verlag, Munich, pp. 1-138.
- [54] A. Rollin (2004) "Long term performance of polymeric geomembranes" *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference*, Session 5D, pp. 20-24.
- [55] L.D. Suits & Y.G. Hsuan (2003) "Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, pp. 111-122.
- [56] G. Wypych & T. Faulkner (1999) "Basic parameters in weathering studies" Chapter in book "Weathering of Plastics - Testing to Mirror Real Life Performance" *Plastics Design Library*, New York, pp. 1-14.
- [57] L.W. Masters & L.F. Bond (1999) "Choices in the design of outdoor weathering tests" Chapter in book "Weathering of Plastics - Testing to Mirror Real Life Performance" *Plastics Design Library*, New York, pp. 15-27.
- [58] G. Wypych (2003) "Handbook of Material Weathering" 3<sup>rd</sup> Ed., ChemTec Publishing, Toronto, 742p.
- [59] A.L. Rollin (1996) "Bacterial clogging of geotextiles" *Proceedings of Geofilters` 96*, Montreal, Canada, pp. 125-134.



- 
- [60] J.P. Giroud (1996) "Granular filters and geotextile filters" *Proceedings of Geofilters` 96*, Montreal, Canada, pp. 565-680.
- [61] K. Badu-Tweneboah, L.G. Tisinger, J.P. Giroud & B.S. Smith (1999) "Assessment of the long-term performance of polyethylene geomembrane and containers in a low-level radioactive waste disposal landfill" *Proceedings of Geosynthetics` 99*, Boston, Massachusetts, USA, vol. 2, pp. 1055-1070.
- [62] C.A. Harper & E.M. Petrie (2003) "Plastic Materials and Processes: a Concise Encyclopedia" John Wiley & Sons, New Jersey, 974p.
- [63] D. Feldman (2002) "Polymer weathering: photo-oxidation" *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 10, n.º 4, pp. 163-173.
- [64] J. Malík & G. Ligner (1998) "Hindered amine light stabilisers: introduction" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 353-359.
- [65] R. Gray (1998) "Hindered amine light stabilisers: recent developments" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 360-371.
- [66] N.S. Allen (1998) "Light and UV stabilisation of polymers" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 428-441.
- [67] R.M. Christie (1998) "Pigments for plastics" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 485-498.
- [68] R. Scherrer & R.L. Sykes (2009) "Colorants - part 1: color, pigments and dyes" Chapter in book "Plastic Additives Handbook" 6<sup>th</sup> Ed., Carl Hanser Verlag, Munich, pp. 831-900.
- [69] Ficha técnica do Chimassorb 944 - disponível em "<http://www.ciba.com>".
- [70] R.W. Crecely & C.E. Day (1998) "Analytical methods for additives in plastics" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 26-31.
- [71] T. Tikuisis & V. Dang (1998) "Antioxidants: their analysis in plastics" Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 80-94.
- [72] H.J. Vandenburg, A.A. Clifford, K.D. Bartle, J. Carroll, I. Newton, L.M. Garden, J.R. Dean & C.T. Costley (1997) "Analytical extraction of additives from polymers" *The Analyst*, vol. 122, pp. 101R-115R.
- [73] W. Freitag (1983) "Determination of a polymeric light stabiliser (Chimassorb 944) in polypropylene" *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, vol. 316, pp. 495-496.
- [74] R. Matuška, L. Preisler & J. Sedlá (1992) "Determination of the polymeric light stabiliser Chimassorb 944 in polyolefins by isocratic high-performance liquid chromatography" *Journal of Chromatography A*, vol. 606, pp. 136-140.
- [75] A. Caceres, F. Ysambertt, J. Lopez & N. Marquez (1996) "Analysis of photostabilizer in high-density polyethylene by reverse-phase and normal-phase HPLC" *Separation Science and Technology*, vol. 31, n.º 16, pp. 2287-2298.
-

- [76] S.T. Hsiao, M.C. Tseng, Y.R. Chen & G.R. Her (2001) "Analysis of polymer additives by matrix-assisted laser desorption ionization/time of flight mass spectrometer using delayed extraction and collision induced dissociation" *Journal of the Chinese Chemical Society*, vol. 48, pp. 1017-1027.
- [77] L. Coulier, E.R. Kaal, M. Tienstra & Th. Hankemeier (2005) "Identification and quantification of (polymeric) hindered-amine light stabilisers in polymers using pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry and liquid chromatography-ultraviolet absorbance detection-evaporative light scattering detection" *Journal of Chromatography A*, vol. 1062, pp. 227-238.
- [78] M.A. Farajzadeh, S.G. Eskandar, A. Ranji & E. Feyz (2007) "HPLC technique for quantification of Chimassorb 944, and its evaluation in analysis of real and standard samples of polyolefins" *Microchimica Acta*, vol. 159, pp. 363-369.
- [79] N. Haider & S. Karlsson (1999) "A rapid ultrasonic extraction technique to identify and quantify additives in poly(ethylene)" *The Analyst*, vol. 124, pp. 797-800.
- [80] S.G. Gharfeh (1987) "Determination of the hindered amine additive chimassorb 944 in polyethylene by high-performance liquid chromatography" *Journal of Chromatography A*, vol. 389, pp. 211-218.
- [81] W. Freitag (1988) "Determination of the polymeric light stabilizer Chimassorb 944 in polyolefins by reversed-phase high-performance liquid chromatography" *Journal of Chromatography A*, vol. 450, pp. 430-432.
- [82] B. Marcato, C. Fantazzini & F. Sevinci (1991) "Determination of polymeric hindered amine light stabilisers in polyolefins by high-performance liquid chromatography" *Journal of Chromatography A*, vol. 503, pp. 415-422.
- [83] P. Perlstein & P. Orme (1985) "Determination of polymeric hindered-amine light stabilisers in plastics by pyrolysis-gas chromatography" *Journal of Chromatography A*, vol. 325, pp. 87-93.
- [84] M.A. Roberson & G. Patonay (1990) "Pyrolytic analysis of complex stabilisers in polypropylene" *Journal of Chromatography A*, vol. 505, pp. 375-384.
- [85] Ficha técnica do Tinuvin 622 - disponível em "<http://www.ciba.com>".
- [86] Ficha técnica do Tinuvin 783 - disponível em "<http://www.ciba.com>".
- [87] J. Accorsi & M. Yu (1998) "Carbon black", Chapter in book "Plastic Additives: An A-Z Reference" Chapman & Hall, London, pp. 153-161.
- [88] A.R. Horrocks, J. Mwila, M. Mirafteb, M. Liu & S.S. Chohan (1999) "The influence of carbon black on properties of orientated polypropylene: 2. Thermal and photodegradation" *Polymer Degradation and Stability*, vol. 65, pp. 25-36.
- [89] M. Mirafteb, A.R. Horrocks & J. Mwila (2002) "The influence of carbon black on properties of orientated polypropylene: 3. Thermal degradation under applied stress" *Polymer Degradation and Stability*, vol. 78, pp. 225-235.

- 
- [90] N.B. McKeown (1998) "Phthalocyanine Materials: synthesis, structure and function" Cambridge University Press, Cambridge, 193p.
- [91] A. W. Eith & G. R. Koerner (1997) "Assessment of HDPE geomembrane performance in a municipal waste landfill double liner system after eight years of service" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 15, pp. 277-287.
- [92] V. Elias, A. Salman & D. Goulias (1998) "The effect of pH, resin properties, and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics" *Geosynthetics International*, vol. 5, n.º 5, pp. 459-490.
- [93] M.L. Lopes & A.V. Monteiro (1999) "Avaliação do comportamento à tracção de geotêxteis sujeitos a agentes de degradação" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 85, pp. 81-107.
- [94] M.L. Lopes & A.V. Monteiro (1999) "Estudo da acção de agentes de degradação no comportamento à tracção de geomembranas" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 87, pp. 33-52.
- [95] D.V. Reddy, F. Navarrete & P. Lai (2000) "Strength and durability of backfill geogrid reinforcement for retaining walls" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 1, pp. 455-458.
- [96] R. Santos, A. Barros & M.L. Lopes (2002) "Chemical degradation of polymeric materials in environmental structures" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> AECEF International Symposium*, Porto, Portugal, pp. R45-R51.
- [97] J. R. Carneiro, P. Almeida, A. Barros, M. P. Lopes & M. L. Lopes (2004) "Durabilidade de geotêxteis - exposição a agentes físicos e químicos. Alguns resultados experimentais" *Actas do 2.º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia - Obras de Aterro*, Aveiro, Portugal, pp. 259-266.
- [98] P.C. Lodi & B.S. Bueno (2004) "Chemical compatibility of HDPE and PVC geomembranes" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 2, pp. 421-424.
- [99] T.D. Stark, H. Choi & P.W. Diebel (2004) "Performance of 30 mil PVC geomembrane exposed to synthetic MSW leachate" *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference*, Session 5D, pp. 8-12.
- [100] M. Rahman & M. Alfaro (2004) "Degradation of polyester geotextiles in alkaline solutions under applied loading" *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference*, Session 4D, pp. 33-39.
- [101] S.B. Gulec, T.B. Edil & C.H. Benson (2004) "Effect of acidic mine drainage on the polymer properties of an HDPE geomembrane" *Geosynthetics International*, vol. 11, n.º 2, pp. 60-72.
- [102] L.M.F. Gomes, F.R. Santos & M.F. Nunes (2006) *Geosynthetics - Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam, vol. 4, pp. 1551-1554.
-

- [103] J. Müller-Rochholz, I. Erdmann, H. Ehrenberg, A. Dobrat & J. Retzlaff (2008) "Assessment of the alkaline hydrolysis of PET" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 6p. (CD-ROM - Paper 139).
- [104] J.M. Jailloux, K.L. Nait-Ali & N. Freitag (2008) "Exhaustive long-term study on hydrolysis of high-tenacity polyester - 10 year results" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 6p. (CD-ROM - Paper 212).
- [105] G. Derombise, L.V. Schoors & P. Davies (2008) "Durability of aramid geotextiles in an alkaline environment" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 7p. (CD-ROM - Paper 287).
- [106] H.F. Schroeder, H. Bahr, P. Herrmann, G. Kneip, E. Lorenz & I. Schmuecking (2000) "Durability of polyolefine geosynthetics under elevated oxygen pressure in aqueous liquids" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 1, pp. 459-464.
- [107] H.F. Schroeder, H. Bahr, E. Lorenz, G. Kneip, I. Schmuecking & E.B. Zeynalov (2002) "Resistance of polyolefin geosynthetics to oxidation - a new accelerated test working at elevated oxygen pressure" *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, vol. 4, pp. 1455-1458.
- [108] M. Boehning, D. Robertson & H.F. Schroeder (2008) "Autoclave testing: a new approach for the evaluation of oxidative long-term resistance of geosynthetics" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 143).
- [109] J. Retzlaff, Z. Bronstein, J. Müller-Rochholz, M. Böhning, D. Robertson & H. Schroeder (2008) "Oxidative resistance of geosynthetics: practical aspects and developments of testing at elevated temperature and oxygen pressure" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 4p. (CD-ROM - Paper 178).
- [110] Y.G. Hsuan & Z. Guan (1998) "Antioxidant depletion during thermal oxidation of high density polyethylene geomembranes" *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, vol. 1, pp. 375-380.
- [111] P. Vink & H.F.N. Fontijn (2000) "Testing the resistance to oxidation of polypropylene geotextiles at enhanced oxygen pressures" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 18, pp. 333-343.
- [112] K.P. von Maubeuge & H. Ehrenberg (2000) "Long-term resistance to oxidation of PP and PE geotextiles" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 1, pp. 465-468.
- [113] W. Mueller & I. Jakob (2000) "Comparison of oxidation stability of various geosynthetics" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 1, pp. 449-454.
- [114] W. Mueller & I. Jakob (2003) "Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes" *Polymer Degradation and Stability*, vol. 79, pp. 161-172.

- 
- [115] W. Mueller, B. Buettgenbach, I. Jakob & H. Mann (2003) "Comparison of the oxidative resistance of various polyolefin geotextiles" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, pp. 289-315.
- [116] M. Li & Y.G. Hsuan (2004) "Temperature and pressure effects on the degradation of polypropylene tape yarns - depletion of antioxidants" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 22, pp. 511-530.
- [117] A. Astruc, P. Bartolomeo, B. Fayolle, L. Audouin & J. Verdu (2004) "Accelerated oxidative ageing of polypropylene fibers in aqueous medium under high oxygen pressure as studied by thermal analysis" *Polymer Testing*, vol. 23, pp. 919-923.
- [118] P. Bartolomeo, A. Astruc, E. Massieu, N. Barberis, S. Lavaud & J.P. Benneton (2004) "Thermo-oxidative ageing of polypropylene geosynthetics monitored by thermal analysis and mechanical tensile test" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 2, pp. 415-420.
- [119] P.C. Lodi & B.S. Bueno (2004) "Degradation of HDPE and PVC geomembranes exposed to heat" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 2, pp. 729-732.
- [120] E. Richaud, F. Farcas & J.P. Benneton (2006) "Influence of temperature, high oxygen pressure in aqueous media on accelerated ageing of polypropylene" *Geosynthetics - Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam, vol. 4, pp. 1547-1550.
- [121] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2006) "Durability of polypropylene geotextiles exposed to several degradation agents - importance of the incorporation of a chemical stabiliser on the geotextiles formulation" *Geosynthetics - Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam, vol. 4, pp. 1559-1562.
- [122] E. Richaud, F. Farcas, L. Divet & J.P. Benneton (2008) "Accelerated ageing of polypropylene geotextiles, the effect of temperature, oxygen pressure and aqueous media on fibers - methodological aspects" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26, pp. 71-81.
- [123] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2008) "Avaliação da resistência dos geotêxteis à termo-oxidação: um novo método vs o método clássico" *Actas do 11.º Congresso Nacional de Geotecnia*, vol. 4, pp. 331-338.
- [124] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2008) "Thermo-oxidation of polypropylene geotextiles" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 180).
- [125] R.W. Thomas & K.V. Maubeuge (2008) "Thermal oxidation of a polypropylene geotextile used in a geosynthetic clay liner" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 10p. (CD-ROM - Paper 234).
- [126] T.L. Baker (1997) "Long-term relationship of outdoor exposure to xenon-arc test apparatus exposure" *Proceedings of Geosynthetics '97*, California, USA, vol. 1, pp.177-190.
-

- [127] D.G. Bright, S.N. Valero & C. Vulova (2004) "Correlation of change in performance properties to longer-term accelerated weathering to years of natural weathering for geogrids" *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference, 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference*, Session 6D, pp. 16-19.
- [128] E. Matheus, E.M. Palmeira & J.A.M. Agnelli (2004) "Degradação de alguns geossintéticos por radiação ultravioleta e variação de temperatura" *Solos e Rochas*, vol. 27, n.º 2, pp. 177-188.
- [129] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2005) "Alguns aspectos da durabilidade de geotêxteis a factores climáticos - simulação laboratorial" *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Geotecnia n.º 104, pp. 43-56.
- [130] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2006) "Durability of polypropylene geotextiles exposed to artificial weathering conditions" *5<sup>th</sup> ICEG Environmental Geotechnics*, Thomas Telford, London, vol. 1, pp. 399-406.
- [131] P.C. Lodi, B.S. Bueno & O.M. Vilar (2008) "Mechanical and thermal properties of HDPE and PVC geomembranes after UV exposure" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 6p. (CD-ROM - Paper 198).
- [132] M. Heindl, H. Zanzinger, A. Zahn & A. Schönlein (2008) "Study of artificial and outdoor weathering of stabilised polypropylene geotextiles" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 286).
- [133] Página da Internet da ATLAS - Material Testing Solutions (<http://www.atlas-mts.com>).
- [134] D.G. Grubb, S.C.J. Cheng & W.E. Diesing III (1999) "High altitude exposure testing of geotextiles in the Peruvian Andes" *Geosynthetics International*, vol. 6, n.º 2, pp. 119-144.
- [135] D.G. Grubb, W.E. Diesing III, S.C.J. Cheng & R.M. Sabanas (2000) "Comparison of geotextile durability to outdoor exposure conditions in the Peruvian Andes and the southeastern USA" *Geosynthetics International*, vol. 7, n.º 1, pp. 23-45.
- [136] D. Fayoux & D. Van Der Sype (2000) "Durability of PVC-P geomembranes - Assessment after very long exposure" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 2, pp. 651-656.
- [137] J.Y. Lee, J.H. Ko & Y.S. Kim (2000) "The evaluation of nonwoven geotextile to outdoor exposure at landfill in Korea" *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference*, Bologna, Italy, vol. 2, pp. 587-589.
- [138] W. Dierickx & P. Van Den Berghe (2004) "Natural weathering of textiles used in agricultural applications" *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 22, pp. 255-272.
- [139] M.d.G.A. Lopes & M. Barroso (2004) "Mechanical performance of HDPE geomembranes seams after sunlight exposure" *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Geosynthetics Conference*, Munich, Germany, vol. 2, pp. 425-428.

- [140] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2008) "Ageing of polypropylene geotextiles under natural weathering conditions" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 177).
- [141] P.C. Lodi & B.S. Bueno (2008) "Analysis of degradation after weathering exposure using MFI and OIT tests" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 5p. (CD-ROM - Paper 201).
- [142] P.C. Lodi, B.S. Bueno, J.G. Zornberg & N.S. Correia (2008) "Analysis of mechanical and physical properties on geotextiles after weathering exposure" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 6p. (CD-ROM - Paper 203).
- [143] C.V.S. Benjamim, B.S. Bueno, P.C. Lodi & J.G. Zornberg (2008) "Installation and ultraviolet exposure damage of geotextiles" *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 8p. (CD-ROM - Paper 226).
- [144] J.R. Carneiro, P.J. Almeida & M.L. Lopes (2009) "Natural weathering of geosynthetics in Portugal" *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Millpress, Rotterdam, vol. 1, pp. 901-904.
- [145] C.P.M. Sá (1998) "Caracterização morfológica, microestrutural e microanalítica de materiais por: microscopia electrónica de varrimento - SEM e microanálise por raios X - EMPA: EDS/WDS" Centro de Materiais da Universidade do Porto, Porto.
- [146] D.A. Skoog, D.M. West & F.J. Holler (1996) "Fundamentals of Analytical Chemistry" 7<sup>th</sup> Ed., Saunders College Publishing, Philadelphia, 870p.
- [147] D.A. Skoog & J.J. Leary (1994) "Análisis Instrumental" 4.<sup>a</sup> Ed., McGraw-Hill, Madrid, 935p.
- [148] P.A. Sewell & B. Clarke (1987) "Chromatographic Separations" Analytical Chemistry by Open Learning, John Wiley & Sons, London, 335p.
- [149] S. Lindsay (1989) "High Performance Liquid Chromatography" Analytical Chemistry by Open Learning, John Wiley & Sons, London, 244p.
- [150] J.C. Miller & J.N. Miller (1988) "Statistics for Analytical Chemistry" 2<sup>nd</sup> Ed., Ellis Horwood Limited, Chichester, 228p.

### Normas citadas no texto

ASTM D543-06 - Standard practices for evaluating the resistance of plastics to chemical reagents.

ASTM D638-08 - Standard test method for tensile properties of plastics.

ASTM D792-08 - Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.

ASTM D854-06 - Standard test methods for specific gravity of soils solids by water pycnometer.

ASTM D882-09 - Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting.

ASTM D1004-09 - Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting.

ASTM D1042-06 - Standard test method for linear dimensional changes of plastics under accelerated service conditions.

ASTM D1204-08 - Standard test method for linear dimensional changes of nonrigid thermoplastic sheeting or film at elevated temperature.

ASTM D1424-09 - Standard test method for tearing strength of fabrics by falling-pendulum (Elmendorf-type) apparatus.

ASTM D1435-05 - Standard practice for outdoor weathering of plastics.

ASTM D1505-03 - Standard test method for density of plastics by the density-gradient technique.

ASTM D1693-08 - Standard test method for environmental stress-cracking of ethylene plastics.

ASTM D1709-09 - Standard test methods for impact resistance of plastic film by the free-falling dart method.

ASTM D1777-96(2007) - Standard test method for thickness of textile materials.

ASTM D1939-08 - Standard test method for tear-propagation resistance (trouser tear) of plastic film and thin sheeting by a single-tear method.

ASTM D1987-07 - Standard test method for biological clogging of geotextile or soil/geotextile filters.

ASTM D2102-02(2007) - Standard test method for shrinkage of textile fibers (bundle test).

ASTM D2259-02(2006)e1 - Standard test method for shrinkage of yarns.

ASTM D2261-07a - Standard test method for tearing strength of fabrics by the tongue (single rip) procedure (constant-rate-of-extension tensile testing machine).

ASTM D2974-07a - Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils.

ASTM D3895-07 - Standard test method for oxidative-induction time of polyolefins by differential scanning calorimetry.

ASTM D4355-07 - Standard test method for deterioration of geotextiles by exposure to light, moisture and heat in a xenon arc type apparatus.

ASTM D4491-99a(2004)e1 - Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity.

ASTM D4533-04(2009) - Standard test method for trapezoid tearing strength of geotextiles.

ASTM D4594-96(2009) - Standard test method for effects of temperature on stability of geotextiles.

ASTM D4595-09 - Standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method.

ASTM D4716-08 - Standard test method for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of a geosynthetic using a constant head.

ASTM D4751-04 - Standard test method for determining apparent opening size of a geotextile.



ASTM D4833-07 - Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products.

ASTM D4885-01(2006) - Standard test method for determining performance strength of geomembranes by the wide strip tensile method.

ASTM D4886-88(2002) - Standard test method for abrasion resistance of geotextiles (sand paper/sliding block method).

ASTM D5199-01(2006) - Standard test method for measuring nominal thickness of geosynthetics.

ASTM D5208-09 - Standard practice for fluorescent ultraviolet (UV) exposure of photodegradable plastics.

ASTM D5261-92(2009) - Standard test method for measuring mass per unit area of geotextiles.

ASTM D5262-07 - Standard test method for evaluating the unconfined tension creep and creep rupture behavior of geosynthetics.

ASTM D5321-08 - Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method.

ASTM D5322-98(2009) - Standard practice for laboratory immersion procedures for evaluating the chemical resistance of geosynthetic to liquids.

ASTM D5397-07 - Standard test method for evaluation of stress cracking resistance of polyolefin geomembranes using notched constant tensile load test.

ASTM D5493-06 - Standard test method for permittivity of geotextiles under load.

ASTM D5496-98(2009) - Standard practice for in field immersion testing of geosynthetics.

ASTM D5721-08 - Standard practice for air-oven aging of polyolefin geomembranes.

ASTM D5747-08 - Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geomembranes to liquids.

ASTM D5884-04a - Standard test method for determining tearing strength of internally reinforced geomembranes.

ASTM D5885-06 - Standard test method for oxidative induction time of polyolefin geosynthetics by high-pressure differential scanning calorimetry.

ASTM D5970-09 - Standard test method for deterioration of geotextiles from outdoor exposure.

ASTM D5993-99(2004) - Standard test method for measuring mass per unit area of geosynthetic clay liners.

ASTM D5994-98(2003) - Standard test method for measuring core thickness of textured geomembrane.

ASTM D6213-97(2009) - Standard practice for test to evaluate the chemical resistance of geogrids to liquids.

ASTM D6241-04(2009) - Standard test method for the static puncture strength of geotextiles and geotextile-related products using a 50-mm probe.

ASTM D6388-99(2005) - Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geonets to liquids.

ASTM D6389-99(2005) - Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geotextiles to liquids.

ASTM D7238-06 - Standard test method for effect of exposure of unreinforced polyolefin geomembrane using fluorescent UV condensation apparatus.

ASTM G7-05 - Standard practice for atmospheric environmental exposure testing of nonmetallic materials.

ASTM G21-96(2002) - Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi.

ASTM G24-05 - Standard practice for conducting exposures to daylight filtered through glass.

ASTM G29-96(2002) - Standard practice for determining algal resistance of plastic films.

ASTM G90-05 - Standard practice for performing accelerated outdoor weathering of nonmetallic materials using concentrated natural sunlight.

ASTM G151-09 - Standard practice for exposing nonmetallic materials in accelerated test devices that use laboratory light sources.

ASTM G152-06 - Standard practice for operating open flame carbon arc light apparatus for exposure of nonmetallic materials.

ASTM G153-04 - Standard practice for operating enclosed arc carbon light apparatus for exposure of nonmetallic materials.

ASTM G154-06 - Standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials.

ASTM G155-05a - Standard practice for operating xenon arc light apparatus for exposure of non-metallic materials.

ASTM G160-03(2009) - Standard practice for evaluating microbial susceptibility of nonmetallic materials by laboratory soil burial.

CEN/TS 14416:2005 - Geosynthetic barriers - Test method for determining the resistance to roots.

CEN/TS 14418:2005 - Geosynthetic barriers - Test method for the determination of the influence of freezing-thawing cycles on the permeability of clay geosynthetic barriers.

EN 12224:2000 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the resistance to weathering.

EN 12225:2000 - Geotextiles and geotextile-related products - Method for determining the microbiological resistance by a soil burial test.

EN 12447:2001 - Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to hydrolysis in water.

- 
- EN 13738:2004 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of pullout resistance in soil.
- EN 14030:2001 - Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquid.
- EN 14196:2003 - Geosynthetics - Test methods for measuring mass per unit area of clay geosynthetic barriers.
- EN 14414:2004 - Geosynthetics - Screening test method for determining chemical resistance for landfill applications.
- EN 14415:2004 - Geosynthetic barriers - Test method for determining the resistance to leaching.
- EN 14575:2005 - Geosynthetic barriers - Screening test method for determining the resistance to oxidation.
- EN 14576:2005 - Geosynthetics - Test method for determining the resistance of polymeric geosynthetic barriers to environmental stress cracking.
- EN 29073-3:1992 - Textiles - Test methods for nonwovens - Part 3: Determination of tensile strength and elongation.
- EN ISO 9863-1:2005 - Geosynthetics - Determination of thickness at specified pressures - Part 1: Single layers.
- EN ISO 9864:2005 - Geosynthetics - Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products.
- EN ISO 10318:2005 - Geosynthetics - Terms and definitions.
- EN ISO 10319:2008 - Geosynthetics - Wide-width tensile test.
- EN ISO 10722:2007 - Geosynthetics - Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading - Damage caused by granular material.
- EN ISO 11058:1999 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load.
- EN ISO 11501:2004 - Plastics - Film and sheeting - Determination of dimensional change on heating.
- EN ISO 12236:2006 - Geosynthetics - Static puncture test (CBR test).
- EN ISO 12956:1999 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of characteristic opening size.
- EN ISO 12957-1:2005 - Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test.
- EN ISO 12957-2:2005 - Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.
- EN ISO 12958:1999 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the water flow capacity in their plane.
- EN ISO 13427:1998 - Geotextiles and geotextile-related products - Abrasion damage simulation (sliding block test).
-

EN ISO 13431:1999 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.

EN ISO 13433:2006 - Geosynthetics - Dynamic perforation test (cone drop test).

EN ISO 13437:1998 - Geotextiles and geotextile-related products - Method for installing and extracting samples in soil, and testing specimens in laboratory.

EN ISO 13438:2004 - Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to oxidation.

EN ISO 13934-1:1999 - Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method.

Especificação do LNEC E203 (1967) - Solos - Determinação do pH.

ISO 175:1999 - Plastics - Methods of test for the determination of the effects of immersion in liquid chemicals.

ISO 846:1997 - Plastics - Evaluation of the action of microorganisms.

ISO 887-1:2009 - Plastics - Methods of exposure to solar radiation - Part 1: General guidance.

ISO 887-2:2009 - Plastics - Methods of exposure to solar radiation - Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass.

ISO 887-3:2009 - Plastics - Methods of exposure to solar radiation - Part 3: Intensified weathering using concentrated solar radiation.

ISO 4892-1:1999 - Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 1: General guidance.

ISO 4892-2:2006 - Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 2: Xenon-arc lamps.

ISO 4892-3:2006 - Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps.

ISO 4892-4:2004 - Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 4: Open-flame carbon-arc lamps.

ISO 11501:1995 - Plastics - Film and sheeting - Determination of dimensional change on heating.

ISO 22088-1:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 1: General guidance.

ISO 22088-2:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 2: Constant tensile load method.

ISO 22088-3:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 3: Bent strip method.

ISO 22088-4:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 4: Ball or pin impression method.

ISO 22088-5:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 5: Constant tensile deformation method.

ISO 22088-6:2006 - Plastics - Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) - Part 6: Slow strain rate method.

ISO/TR 12960:1998 - Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to liquids.

NP EN 12224:2007 - Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência ao envelhecimento devido ao clima (versão Portuguesa da norma EN 12224:2000).

NP EN 12226:2005 - Geotêxteis e produtos relacionados - Ensaio gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade (versão Portuguesa da norma EN 12226:2000).

NP EN 29073-3:1993 - Têxteis - Métodos de ensaio para tecidos não-tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento (versão Portuguesa da norma EN 29073-3:1992).

NP EN ISO 9862:2007 - Geossintéticos - Amostragem e preparação de provetes (versão Portuguesa da norma EN ISO 9862:2005).

NP EN ISO 9863-1:2006 - Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples (versão Portuguesa da norma EN ISO 9863-1:2005).

NP EN ISO 9864:2006 - Geossintéticos - Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados (versão Portuguesa da norma EN ISO 9864:2005).

NP EN ISO 10319:2005 - Geotêxteis - Ensaio de tracção em tiras largas (versão Portuguesa da norma EN ISO 10319:1996).

NP EN ISO 11058:2003 - Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento (versão Portuguesa da norma EN ISO 11058:1999).

NP EN ISO 12236:2008 - Geossintéticos - Ensaio de punçoamento estático (ensaio CBR) (versão Portuguesa da norma EN ISO 12236:2006).

NP EN ISO 13438:2006 - Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da resistência à oxidação (versão Portuguesa da norma EN ISO 13438:2004).

NP EN ISO 13934-1:2001 - Têxteis - Propriedades de tracção dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira (versão Portuguesa da norma EN ISO 13934-1:1999).

